Elektronica en Telecommunicatie 7

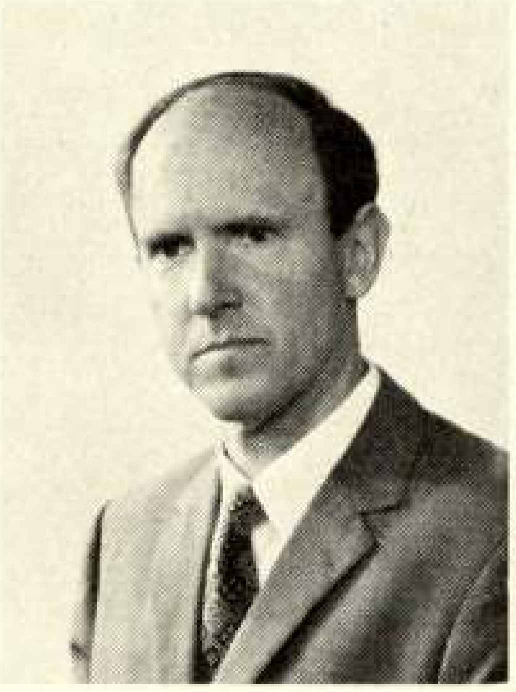
Gemeenschappelijke publikatie van de
Sectie voor Telecommunicatietechniek van het K.I.v.I. en het
Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap.
Redactie-adres: Prinsessegracht 23, Den Haag.

621.391.83:621.397

Informatie-overdracht met beeldversterkende systemen

door dr. ir. G. van Aller en dr. W. Kühl,

N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven





Summary: *Information transfer with image intensifying systems.*
A description is given of the functioning of image intensifiers and the properties of their components. The photocathode, electron optics, viewing screen and fiber optics are described.

Starting from detail contrast perceptibility of the eye, and using properties from communication theory such as modulation transfer and signal to noise ratio, problems concerning information transfer and image quality are treated. A noise factor is introduced, which describes the decrease of the signal to noise ratio as a result of imaging. An expression for detail contrast perceptibility is derived; with this formula a restricted comparison can be made for image intensifying systems.

Besides the X-ray image intensifier a number of other applications are mentioned.

Gebruikte symbolen

S	= Signaal
R	= Ruis
D	= Röntgendosis
A	= Absorptie in röntgenscherm
μ	= Absorptie-coëfficiënt voor röntgenstralen
ν_1	= Lichtextinctie-coëfficiënt voor röntgenschermen
C_u	= Contrast van beeld, uitgangszijde
C_i	= Contrast van voorwerp, ingangszijde
$T(\nu)$	= Modulatie-overdrachtsfunctie
ν	= Ruimtelijke frequentie
Δ	= Karakteristieke dimensie van een detail
n_0	= Aantal fotonen aan ingangszijde per seconde per oppervlakte-eenheid
τ	= Integratietijd oog, $\sim 0{,}2$ s
$i(x, y)$	= Luminantieverdeling voorwerp
$u(x', y')$	= Luminantieverdeling beeld
$i(x', y')$	= Luminantieverdeling beeld bij ideale afbeelding
$e_{x,y}$	= Afwijking tussen beeld en voorwerp
$g(x, y)$	= Puntspreidfunctie
$S(\omega)$	= Vermogens- of Wiener-spectrum
F	= Ruisfactor
p_0	= n_0
p_i, b_i	= Versterkingsfactoren voor processen met poisson-, resp. binomiale waarschijnlijkheidsverdeling
θ	= Open oppervlak 'channel multiplier'-matrix

Voordracht, gehouden in het kader van de tentoonstelling 'Het Instrument' voor het NERG op 10 oktober 1969 te Utrecht.

1. Inleiding

1.1. Algemeen

In de geneeskunde zijn verschillende beeldvormende en beeldversterkende systemen bekend, zoals röntgen-beeldversterking, thermografie voor langgolvig infrarood, klassieke fotografie, ultrasonore beeldvormende technieken en de γ-camera voor afbeelding van radio-actieve straling. Het is de bedoeling, in dit artikel nader in te gaan op de informatie-overdracht met beeldversterkers zoals röntgen-beeldversterkers [1, 2] en beeldversterkers voor zichtbaar licht en het nabije infrarood. De problematiek van informatie-overdracht met beeldversterkers is nl. grotendeels analoog voor beide groepen, terwijl er juist voor beeldversterkers voor zichtbaar licht de zgn. helderheidsversterkers de laatste tijd ook in de geneeskunde enkele interessante toepassingen mogelijk zijn gebleken. Een uitvoerige beschrijving van helderheidsversterkers en hun gebruik is te vinden bij *Soule* [3].

1.2. Redenen voor beeldversterking

Zonder reeds hier teveel in details te gaan zijn er direct een aantal redenen op te noemen, waarom beeldversterking zinvol kan zijn.

1.2.1. Golflengte-transformatie. Voor röntgenstraling is dit zonder meer duidelijk, doch op zichzelf nog geen argument voor beeldversterking (röntgen-fluorescopie zonder beeldversterking is zeer gebruikelijk). Voor het nabije infrarood is een dergelijke transformatie goed uitvoerbaar met een beeldversterker; beeldversterkers voor dit golflengtegebied worden dan ook als regel beeldomvormers genoemd.

1.2.2. Quantumrendement van een fotokathode. Dit is vaak aanzienlijk hoger dan het quantumrendement van het netvlies in het oog, hetgeen de signaal-ruisverhouding van het beeld (waar later zal worden op ingegaan) gunstig beïnvloedt. Bovendien is het ook hoger dan het quantumrendement van fotografische emulsies of het (effectieve) quantumrendement van een TV-camera-buis.

1.2.3. Vergroting intreepupil. De intreepupil van een beeldversterkend systeem kan aanzienlijk groter zijn dan de intreepupil van het oog. In het algemeen kan gezegd worden, dat het nuttig effect van een beeldversterkend systeem kwadratisch toeneemt met de diameter van de intreepupil.

1.2.4. Verbetering detail-contrastwaarneembaarheid. De detail-contrastwaarneembaarheid, waar hieronder uitvoeriger op zal worden ingegaan, is sterk afhankelijk van de signaal-ruisverhouding en daarmee van de helderheid (fig. 1). Met beeldversterking is een verbetering van de signaal-ruisverhouding van het beeld te bereiken, zoals dit met het netvlies van het oog wordt waargenomen; dit heeft dan een verbetering van de detail-contrastwaarneembaarheid als resultaat.

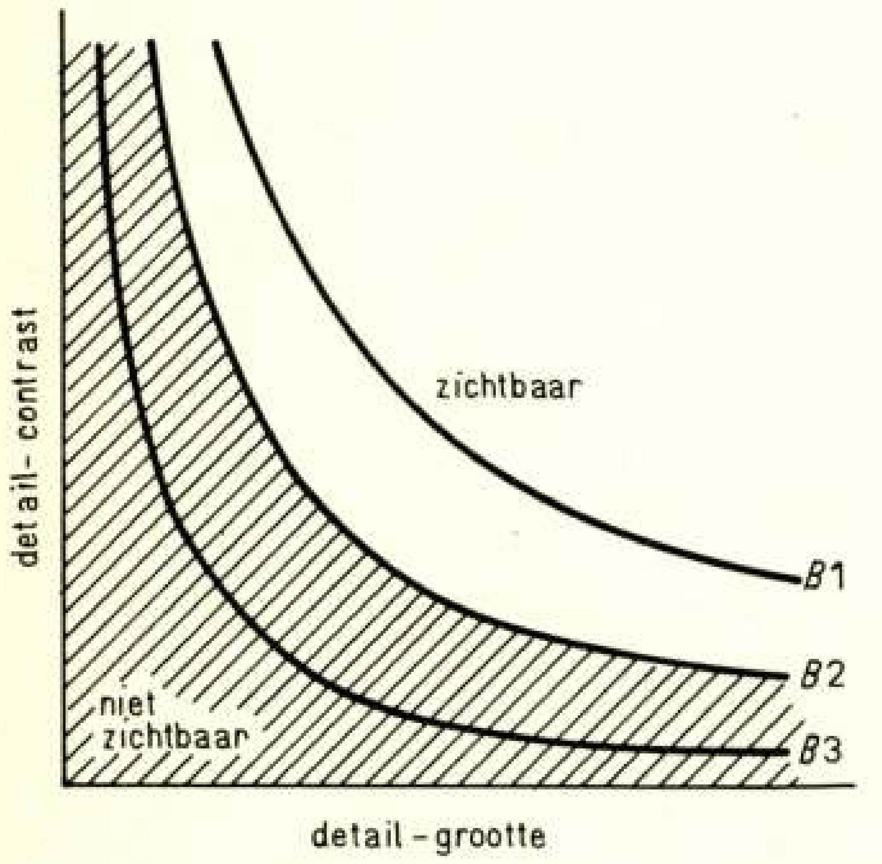


Fig. 1. Schematische weergave van het waarneembare contrast als functie van de detailgrootte, met de helderheid als parameter; $B_3 > B_2 > B_1$.

1.2.5. Verbetering gebruiksmogelijkheden. Hoewel beeldversterking een schijnbare verslechtering van de beeldkwaliteit kan geven (bijv. t.o.v. fotografie) staan hier meer uitgebreide gebruiksmogelijkheden tegenover (vooral als met een TV-camera gedetecteerd wordt) zoals: distributie van het beeld naar andere plaatsen, elektronische bewerking van de signalen en vrijheid van beweging bij onderzoek.

1.3. Korte inhoud
Begonnen zal worden met een beschrijving van de werkwijze van beeldversterkers en de eigenschappen van de componenten waaruit beeldversterkers zijn opgebouwd. Besproken worden de fotokathode, de elektronen-optiek, het kijkscherm en het gebruik van vezeloptiek-vensters.

Vervolgens worden een aantal punten rond de begrippen informatie-overdracht en beeldkwaliteit behandeld, waarbij het uitgangspunt de contrastwaarneembaarheid van het oog is. Gebruik wordt gemaakt van begrippen uit de communicatietheorie, zoals modulatie-overdracht en signaal-ruiseigenschappen. Hierbij wordt een ruisfactor ingevoerd, die de verslechtering van de signaal-ruisverhouding ten gevolge van de afbeelding weergeeft. Het resultaat is een uitdrukking voor de detail-contrastwaarneembaarheid met beeldversterkende systemen, die een beperkte vergelijking van dit soort systemen mogelijk maakt.

Tenslotte zullen, behalve de röntgen-beeldversterkers, enkele andere toepassingen genoemd worden.

2. Werkwijze en componenten van beeldversterkers

2.1. Werkwijze
In fig. 2 is schematisch een beeldversterker weergegeven; deze bestaat in wezen uit een vacuüm gepompte omhulling, waarbinnen een fotokathode, een elektronen-optiek en een kijkscherm.

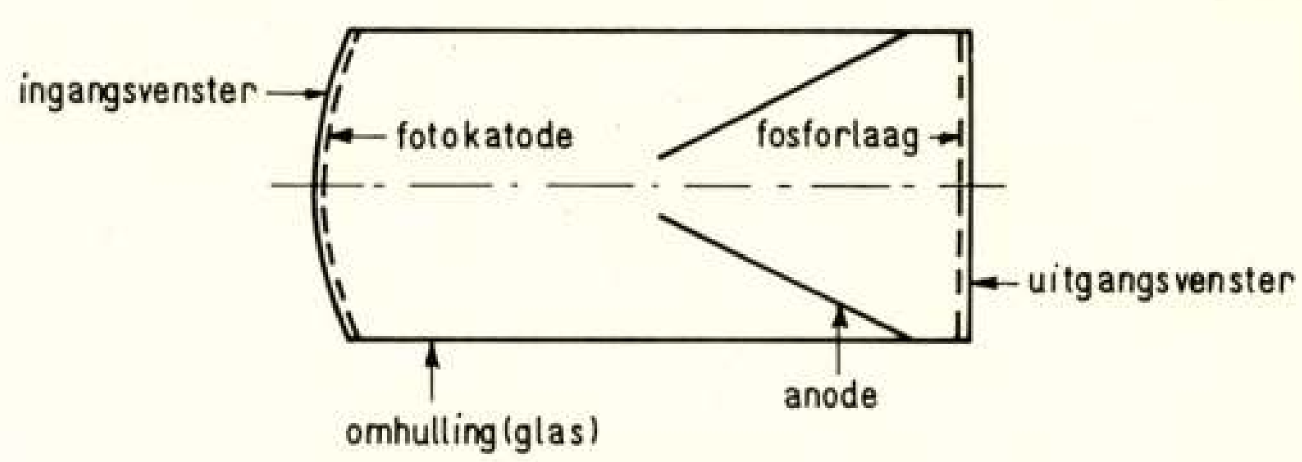


Fig. 2. Schematische voorstelling van een helderheidsversterker.

In het geval van een helderheidsversterker voor zichtbaar licht wordt d.m.v. een lenzenstelsel de scène of het te bestuderen lichtverschijnsel afgebeeld op de fotokathode. In röntgen-beeldversterkers wordt eerst het röntgen-beeld d.m.v. een geschikte fosfor omgezet in een zichtbaar beeld; vervolgens wordt de fotokathode geëxciteerd. De fotokathode is een dunne geleidende laag, voor lichtversterkers als regel aangebracht op de binnenzijde van het ingangsvenster. Ten gevolge van opvallend licht emitteert deze laag elektronen; hierbij is voor elk punt de elektronen-emissie evenredig met de lichtsterkte ter plaatse; het optisch beeld wordt op deze manier omgezet in een elektronenbeeld. Deze foto-elektronen worden d.m.v. een elektrostatisch veld versneld naar de anode en op het kijkscherm gefocusseerd. Het kijkscherm bestaat uit een fosfor welke licht emitteert onder invloed van opvallende snelle elektronen, waarbij de plaatselijke luminantie weer evenredig is met de elektronenstroomdichtheid. Op deze manier wordt door het kijkvenster een optisch beeld zichtbaar, dat in zijn luminantieverdeling overeenkomt met het optisch beeld aan de ingangszijde; wel vindt hierbij een rotatie van 180° plaats.

De helderheidsversterking kan gesplitst worden in *lichtstroom-* en *luminantieversterking*. De *lichtstroomversterking* wordt bepaald door de (meestal vastliggende) energie-rendementen van fotokathode en kijkschermfosfor en de (tussen grenzen instelbare) versnellingsspanning; bij quantumrendementen rond 0,1 (versnellingsspanningen van $\sim 10^4$ V) worden lichtstroomversterkingen van 50 à 100 bereikt. De *luminantieversterking* is een gevolg van de verhoging van de stroomdichtheid t.g.v. elektronenoptisch verkleinde afbeelding van de fotokathode op het

kijkscherm; zij neemt toe met het kwadraat van de verkleiningsfactor.

2.2. Fotokathode

In de fotokathode vindt omzetting van lichtquanten in foto-elektronen plaats. Hij bestaat uit een dunne halfgeleider, waarvan de dikte, enkele 100Å, een compromis is tussen optische absorptie en de ontspanningskans voor geëxciteerde elektronen in vacuüm [4, 5].

In fig. 3 is voor een aantal bekende fotokathoden de absolute gevoeligheid gegeven als functie van λ, met ingetekend de lijnen die het quantumrendement aangeven. In de meeste röntgen-beeldversterkers wordt de S-11-kathode (een Cs-Sb-verbinding) gebruikt, in helderheidsversterkers als regel de S-20 of de meer roodgevoelige S-25-kathode; beide zijn tri-alkali Sb-verbindingen: Na-K-Cs-Sb. De S-1-kathode, een verbinding van Ag-O-Cs, loopt verder door in het infrarood, maar de veel hogere thermische emissie maakt gebruik in helderheidsversterkers voor zeer lichtzwakke verschijnselen zonder koeling niet mogelijk.

In tabel 1 is een overzicht gegeven van de genoemde in gebruik zijnde typen fotokathoden. In de eerste kolom staat de type-aanduiding met de internationaal gebruikelijke code; in de tweede kolom is de globale chemische samenstelling aangegeven. De gevoeligste kathoden (zie kolom 3) zijn de alkali-antimoonverbindingen; in de 4e en 5e kolom zijn, onderscheidenlijk, de golflengte waarbij de spectrale gevoeligheid maximaal is en de grensgolflengte gegeven.

Tabel 1. Eigenschappen van enkele typen fotokathoden.

S-nr.	Chemische samenstelling	Gevoeligheid (μA/lm)	$\lambda_{max.}$ (nm)	λ_{grens} (nm)	Thermische emissie (25 °C) (A/cm^2)
S-1	Ag-O-Cs	25	800	1100	$10^{-11} \ldots 10^{-13}$
S-11	Cs_3Sb-O	60	450	700	$10^{-14} \ldots 10^{-15}$
S-20	Na_2KSb-Cs	150	440	800	$10^{-15} \ldots 10^{-16}$
S-25	Na_2KSb-Cs	200	450-600	950	$10^{-15} \ldots 10^{-16}$

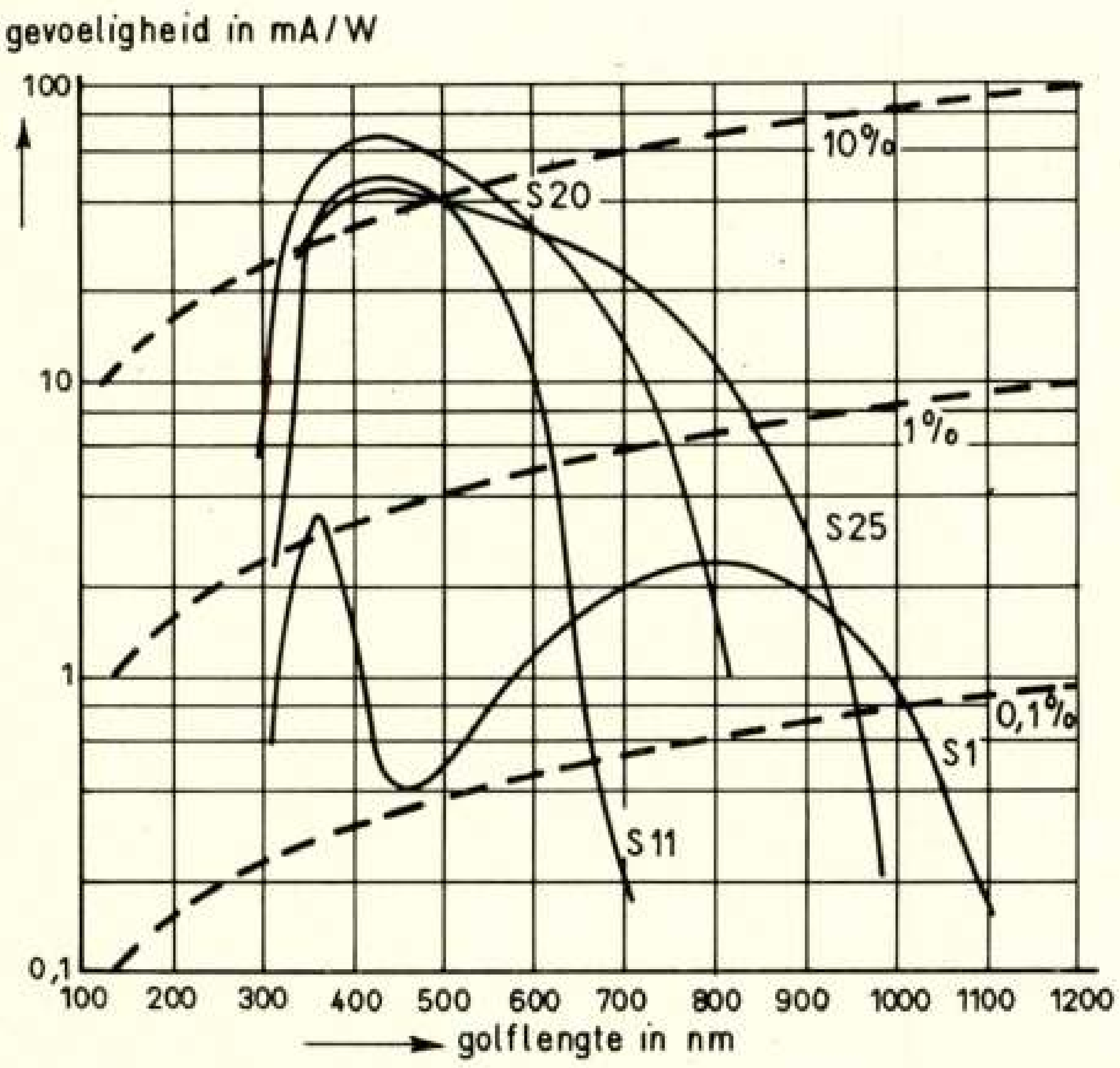


Fig. 3. Spectrale gevoeligheid van enkele gangbare typen fotokathoden.

2.3. Röntgenscherm

Voor voldoende absorptie van röntgenstralen zou de fotokathode zo dik moeten zijn, dat de kans op emissie van geëxciteerde elektronen minimaal wordt. In dit geval wordt eerst d.m.v. een fosfor de röntgenstraling in zichtbaar licht omgezet; vervolgens vindt omzetting in foto-elektronen plaats. Verder moet ook de spectrale gevoeligheid van de fotokathode passen bij de spectrale emissie van de röntgen-fosfor om een efficiënte conversie van röntgenquanten in foto-elektronen te verkrijgen. Chromatische aberratie moet echter zo veel mogelijk vermeden worden (zie onder).

In röntgen-beeldversterkers is het uiteraard noodzakelijk, dat de fotokathode optisch goed gekoppeld is met de fosforlaag, om verlies aan oplossend vermogen t.g.v. lichtuitstraling van het fosforscherm in alle richtingen te voorkomen.

2.4. Elektronenoptiek

Door het elektrostatisch veld, dat ontstaat door het spanningsverschil tussen kathode en anode, worden de foto-elektronen versneld en gefocusseerd. In röntgen-beeldversterkers is een spanningsverschil van ca. 25 kV gebruikelijk, in helderheidsversterkers ca. 15 kV.

De afbeeldingseigenschappen baseren zich op die van de afbeelding in een bolsymmetrische potentiaalverdeling [6]; elektronen van een sferisch kathode-oppervlak worden dan gefocusseerd in een eveneens sferisch beeldvlak. Bij gebruik van een vlak kijkscherm betekent dit dat de afbeelding bijv. alleen centraal scherp is t.g.v. beeldveldkromming. Een tweede afbeeldingsfout is de chromatische aberratie: een punt op de kathode wordt als een vlakje afgebeeld, waarvan de diameter evenredig is met de gemiddelde emissie-energie van de foto-elektronen. Deze laatste is sterk afhankelijk van het energieverschil, corresponderend met het verschil tussen de golflengte van het licht waarmee de kathode in hoofdzaak geëxciteerd wordt en de grensgolflengte van de fotokathode. Het hiermee corresponderend energieverschil moet zo klein zijn om de chromatische aberratie zo klein mogelijk te houden.

Gezien de gewenste grootte van het ingangsvlak in röntgen-beeldversterkers (centraal-projectie van organen) en de wenselijkheid van een klein beeld aan de uitgang (in verband met het gebruik van optieken met grote opening voor film- en TV-koppeling) wordt bij röntgen-beeldversterkers elektronenoptische reductie toegepast. In fig. 4 is de elektronenoptiek van een 9″-röntgen-beeldversterker met variabele reductiefactor gegeven [7]; een reductiefactor van ca. 10 maal is gebruikelijk

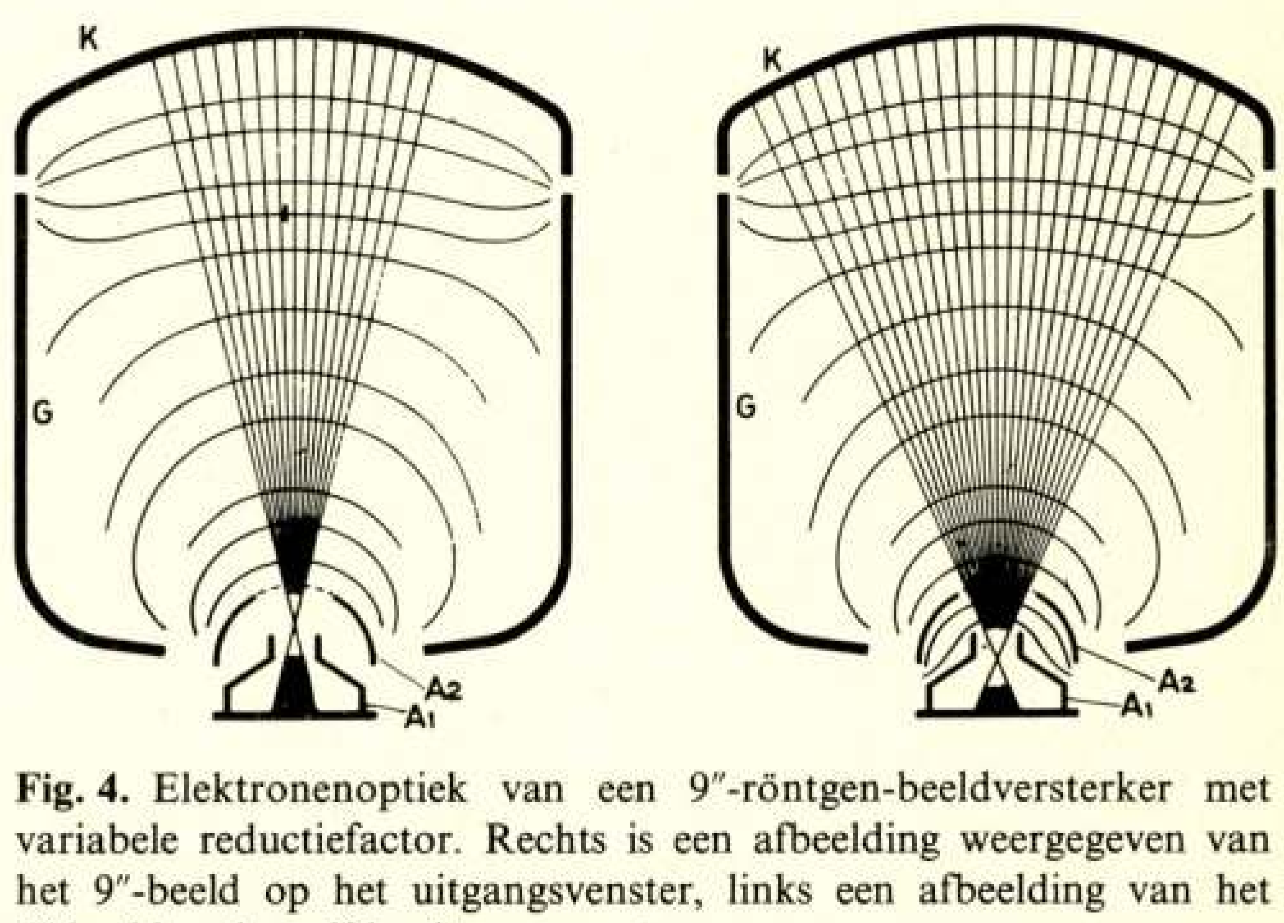


Fig. 4. Elektronenoptiek van een 9″-röntgen-beeldversterker met variabele reductiefactor. Rechts is een afbeelding weergegeven van het 9″-beeld op het uitgangsvenster, links een afbeelding van het 5″-beeld op hetzelfde uitgangsvenster.

(9″-situatie), zodat de luminantie-versterking in dit geval reeds 100 maal bedraagt. Röntgen-beeldversterkers zijn bovendien als triode, tetrode of pentode uitgevoerd: door middel van de juiste spanningen op de elektroden wordt optimale focussering ingesteld.

2.5. Kijkscherm

Het kijkscherm bestaat uit fosforkristallen, gesedimenteerd op het uitgangsvenster. Hoewel in principe een grote keus (voor wat betreft spectrale emissie en persistentie) in fosforen mogelijk is, zijn op grond van factoren als energierendementen, oplossend vermogen en technologie voor het aanbrengen slechts enkele algemeen in gebruik. Zo is voor directe visuele waarneming de groen licht emitterende ZnCdS-fosfor gebruikelijk; voor detectie met een camerabuis (bijv. een Plumbicon) heeft een blauw emitterende ZnS-fosfor de voorkeur voor wat totale versterking en oplossend vermogen betreft. Terugkoppeling van het licht naar de fotokathode wordt voorkomen door een dunne Al-'backing'-laag aan de vacuümzijde, waardoor tevens het lichtrendement door reflectie wordt verhoogd en oplading van de fosfor wordt voorkomen.

In tabel 2 zijn voor de 2 gangbare typen fosforen de belangrijkste gegevens vermeld.

Tabel 2. Eigenschappen van de twee meest gebruikte typen fosforen.

P-nr.	Chemische samenstelling	Kleur-emissie	λ voor max. emissie	Energie-rendement	Quantum-opbrengst (fotonen/eV)
P-11	Zns:Ag(Ni)	blauw	460 nm	0,15	0,055
P-20	ZnCdS:Ag	geel-groen	530 nm	0,15	0,067

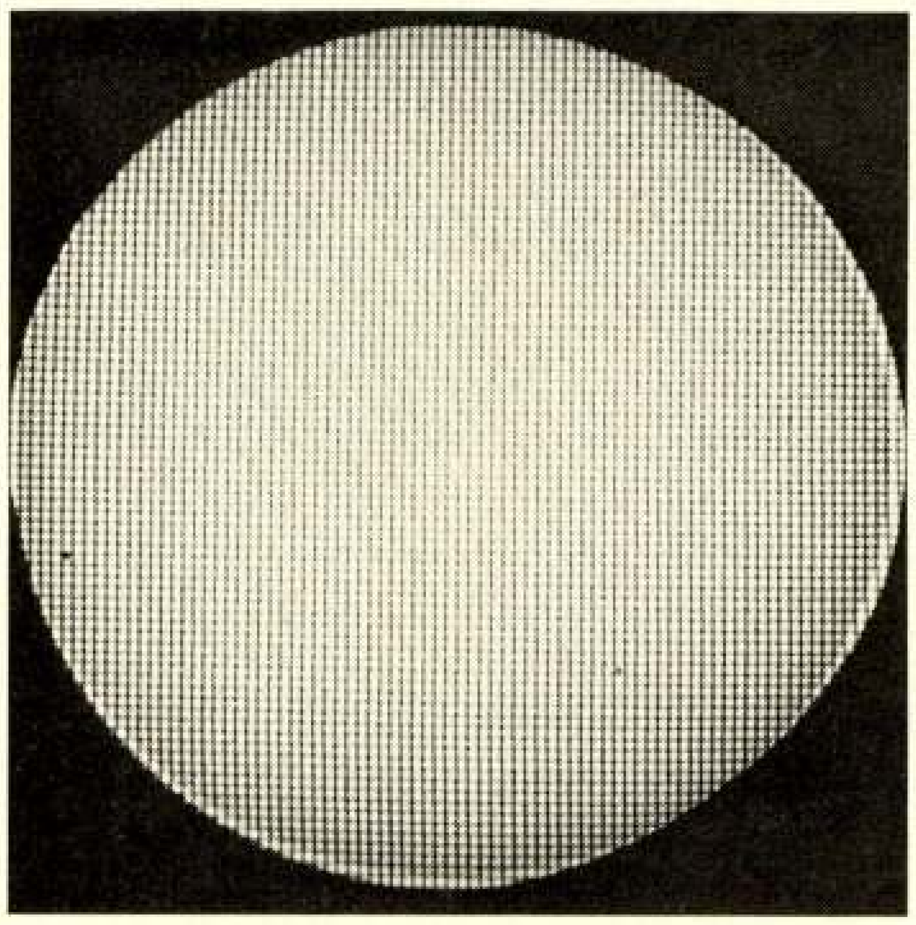
2.6. Vezeloptiek

Een van de afbeeldingsfouten in deze elektrostatische systemen is, zoals reeds genoemd, de beeldveldkromming. Bij gebruik van plano-concave vezeloptiek-vensters is het nu mogelijk, de concave zijde van het kijkscherm aan te passen aan de beeldveldkromming; hiermee kan bereikt worden dat het oplossend vermogen aan de rand vergelijkbaar wordt met het oplossend vermogen centraal, terwijl bovendien de vertekening nul kan zijn. Ter illustratie hiervan zijn in de fig. 5a en 5b foto's van een gaas weergegeven, gemaakt met een beeldversterker met, resp. zonder, vezeloptiek-vensters.

Uiteraard moet de diameter van de vezels klein genoeg zijn om een voldoend hoog oplossend vermogen te bereiken. Diameters van 5 µm zijn gebruikelijk; een uitgebreide beschrijving over vezeloptieken is te vinden bij *Kapany* [8]. Behalve het voorgaande zijn er enkele praktische voordelen verbonden aan het gebruik van vezeloptiek-in- en uitgangsvensters:

- In vezeloptiek-platen is de zijdelingse lichtuitbreiding zeer gering; daardoor verminderen halo-verschijnselen, die in vlakke glazen vensters door reflecties aan de grensvlakken en door zijdelingse lichtuitbreiding kunnen ontstaan. In de fig. 6a en 6b is dit verschil in halo-werking tussen een helderheidsversterker met vezeloptiek-vensters en een helderheidsversterker zonder vezeloptiek-vensters weergegeven.
- Een plano-concaaf ingangsvenster betekent een vlakke ingangszijde in plaats van een sferisch gekromd oppervlak. Dit kan aantrekkelijk zijn voor het aanpassen van de ingangsoptiek bij helderheidsversterkers.
- De vlakke in- en uitgangszijde maakt directe koppeling van twee of meer helderheidsversterkers en ook directe koppeling met een camerabuis voorzien van vezeloptiek-ingangsvenster mogelijk. Vergeleken bij lenskoppeling is er een aanzienlijke ruimte- en gewichtsbesparing; bovendien wordt nu al het licht uit de kijkschermfosfor opgevangen, terwijl bij lenskoppeling (afhankelijk van de lensopening) een beperkt deel van de ruimtehoek 2π wordt bestreken. Voor weinig verlies voor wat de modulatie-overdrachtsfunctie betreft moet de grootte van de luchtspleet tussen de platen (bijv. ten gevolge van onvlakheid) niet groter dan 1 à 2 µm zijn.

  Ter illustratie is in fig. 7 een vezeloptiek-gekoppelde combinatie van twee helderheidsversterkers met een camerabuis gegeven.
- Bij fotografie van het kijkschermbeeld kan een film direct tegen het vlakke vezeloptiek-uitgangsvenster gelegd worden. Er vindt nu geen lichtverlies plaats zoals bij lenskoppeling ten gevolge van de beperkte apertuur (vezeloptiek-koppeling: 60% transmissie, lenskoppeling: 25% doorlating voor F:0,75).



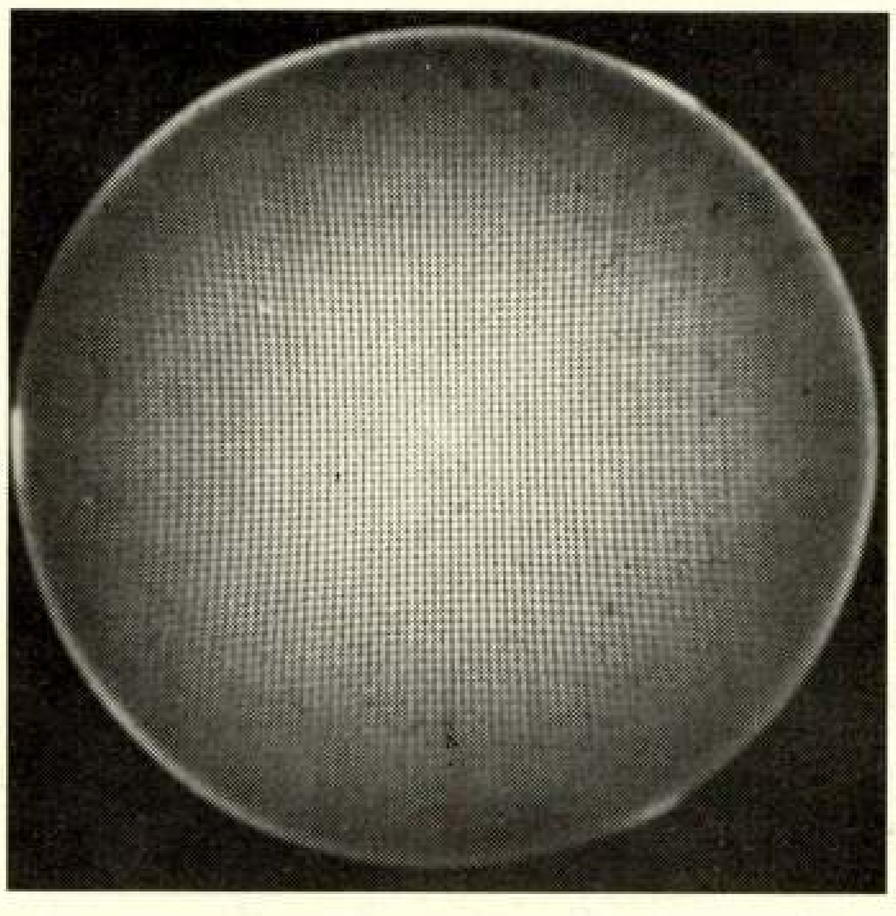


Fig. 5. Foto van een gaas, genomen met een helderheidsversterker met vezeloptiek-venster (fig. 5a) (vergroting 1 ×) en met een helderheidsversterker zonder vezeloptiek-venster (fig. 5b) (vergroting 0,7 ×). Het verschil in vertekening en oplossend vermogen aan de rand is duidelijk zichtbaar.

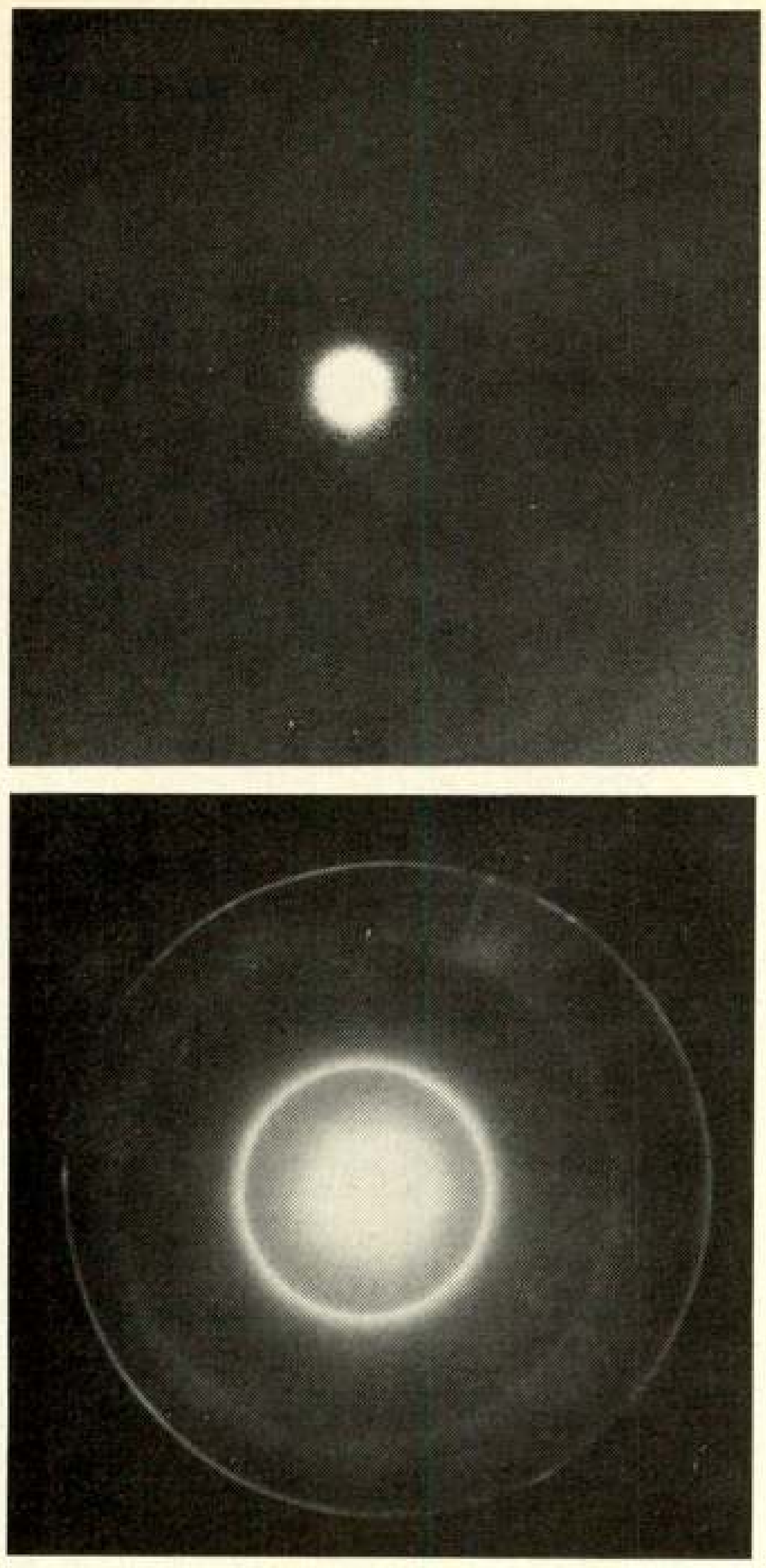


Fig. 6. Halo-effect in helderheidsversterker met (fig. 6a) resp. zonder (fig. 6b) vezeloptiek-vensters.

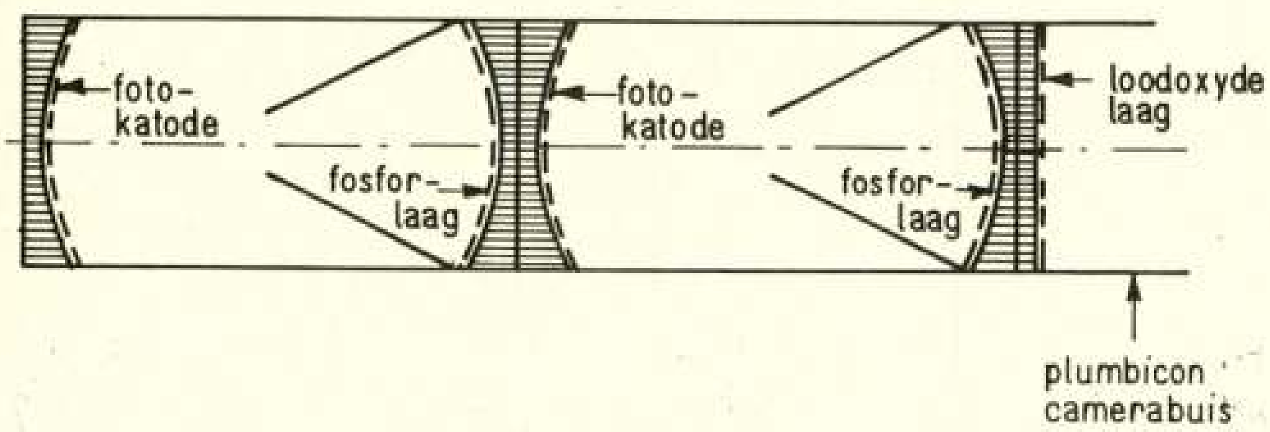


Fig. 7. 2-traps helderheidsversterker met camerabuis.

3. Informatie-overdracht

Wanneer de vraag gesteld wordt, hoe informatie-overdracht met een beeldversterkend systeem plaatsvindt, doet zich direct het volgende vraagpunt voor: Bestaan er objectieve kenmerken, waarmee de informatie-overdracht van een systeem kan worden gekarakteriseerd? Uitgaande van de theorie van *Rose* [9] over de contrastwaarneembaarheid van het oog en gebruik makende van concepten uit de communicatie-theorie, is het mogelijk onder bepaalde voorwaarden tot een kwantitatieve waardering van de kwaliteit van beeldversterkende systemen te komen voor wat de overdracht van optische informatie betreft.

3.1. Contrastwaarneembaarheid

De laatste schakel van een beeldversterkend systeem is het netvlies van het oog, waarmede het beeld wordt waargenomen, in directe verbinding met de hersenen waar de informatie wordt verwerkt. De definitie van het begrip beeldkwaliteit wordt dan bijzonder moeilijk, omdat de vraag eigenlijk luidt: Welke eigenschappen zijn relevant bij vergelijking van verschillende systemen door een getrainde waarnemer, om uit het waargenomen beeld tot een juiste beslissing over het object te kunnen komen? Dit is een gecompliceerd fysiologisch en psychologisch proces, waarbij het er in feite om gaat de relevante signalen te onderkennen en spatiaal te correleren te midden van een groot aantal irrelevante signalen. Bovendien heeft het 'oog', afhankelijk van de detailgrootte, een integrerende werking. Al deze processen zijn sterk afhankelijk van allerlei omstandigheden zoals voorkennis omtrent hetgeen wordt waargenomen, ervaring en andere – niet-visuele – informatie over hetzelfde object.

Ter illustratie hiervan zijn in fig. 8 twee op het eerste gezicht identieke beelden gegeven, waartussen toch echter een aantal (6) kleine verschillen aanwezig zijn. *Zonder* voorkennis (of bijv. auditieve informatie) zal het veel tijd vergen om de afwijkingen – dus de relevante informatie – te vinden tussen de irrelevante informatie; *met* voorkennis is het een kwestie van enkele seconden.

Behalve de gecompliceerde wijze waarop visuele informatie wordt verwerkt is een volgende factor die de beeld-evaluatie kan beïnvloeden, het zichtbaar worden van ruis in het beeld. Met het ongewapende oog ziet men tot de laagste lichtniveaus geen ruis; de versterking van een beeldversterkend systeem kan echter zodanig zijn dat ruis wel zichtbaar wordt en de waar-

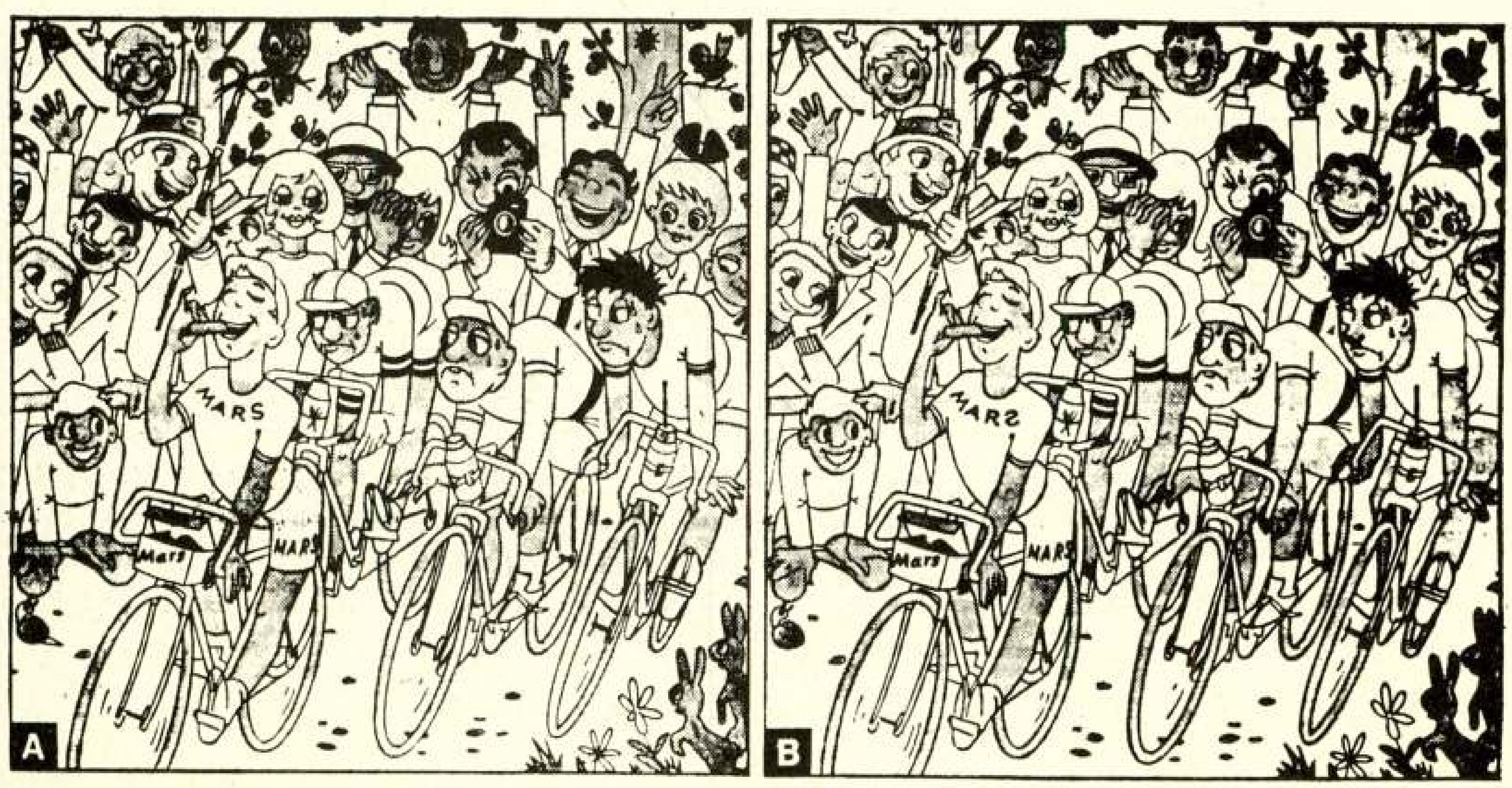


Fig. 8. Relevante en irrelevante informatie.

neming gaat beïnvloeden [10]. Zo is bijv. bij een röntgenbeeldversterker de versterking zodanig, dat de signaal-ruisverhouding van een waarneembaar beeldelement op de retina gelijk is aan de signaal-ruisverhouding van dat element op het röntgenscherm. Deze wordt bepaald door de fluctuaties van het aantal werkzame (geabsorbeerde) röntgen-quanten in dat beeldelement gedurende de integratietijd van het oog.

Als voorbeeld hiervan zijn in fig. 9 metingen van de signaal-ruisverhouding (relatief) aan röntgen-schermen gegeven, als functie van de schermdikte en de stralingskwaliteit als parameter. Op grond van met de dikte toenemende absorptie zou S/R continu blijven stijgen (kromme $\sqrt{DA}$), maar t.g.v. extinctie van het geëxciteerde licht (vooral in de diepere lagen van het röntgen-scherm) is er een toenemende afwijking. De lichtextinctie-coëfficiënt hangt vnl. af van reflecties aan fosforkorrels en daarmee van de korrelgrootte [11].

Een veel gebruikte methode voor de beschrijving van de contrastwaarneembaarheid van het oog, bij aanwezigheid van ruis, heeft als uitgangspunt metingen van *Blackwell* [12] en een theoretische beschouwing van *Rose* [9]. Deze zijn later uitgebreid met waarnemingen van verschillende beelden, o.m. *Kühl* [13]: Beelden van röntgen-beeldversterkers met ruis; *Schade* [14]: Fotografische beelden en *Coltman* and *Anderson* [15]: TV-monitorbeelden.

Het is gebleken, dat de contrastwaarneembaarheid van deze in karakter geheel verschillende beelden beschreven kan worden met de volgende empirische relatie [16]:

$$C_u = k \cdot \left(\frac{R}{S} \right)_u \tag{1}$$

In deze betrekking is k een empirisch bepaalde constante, die afhangt van het soort detail dat beschouwd wordt; voor eenvoudige details is k ca. 2,8. Deze betrekking beschrijft in hoofdzaak signaaldetectie van van te voren bekende details; zij beschrijft zeker niet het herkennen van beelden met een hoge informatie-inhoud. Toch sluit deze behandeling het beste aan bij wat bekend is over de verwerking van informatie met het oog. C_u is het beeldcontrast aan de uitgang van het systeem. Is het contrast van het voorwerp C_i, dan kan de contrastvermindering van sinusvormig gemoduleerde lijnenrasters ten gevolge van de afbeelding beschreven worden met de modulatie-overdrachtsfactor $T(\nu)$ (zie ook fig. 10):

$$C_u(\nu) = T(\nu) \cdot C_i(\nu) \tag{2}$$

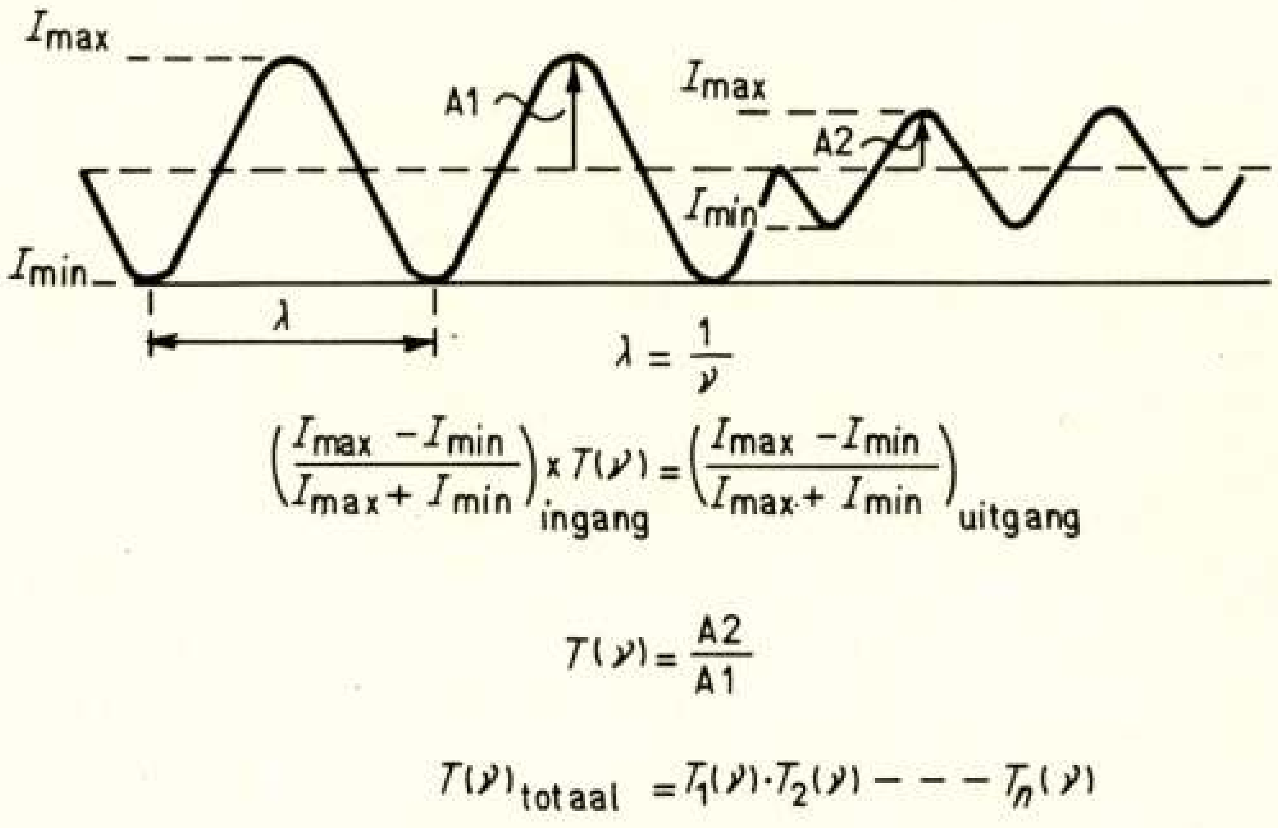


Fig. 10. Verkleining van sinusvormige modulatie ten gevolge van optische afbeelding.

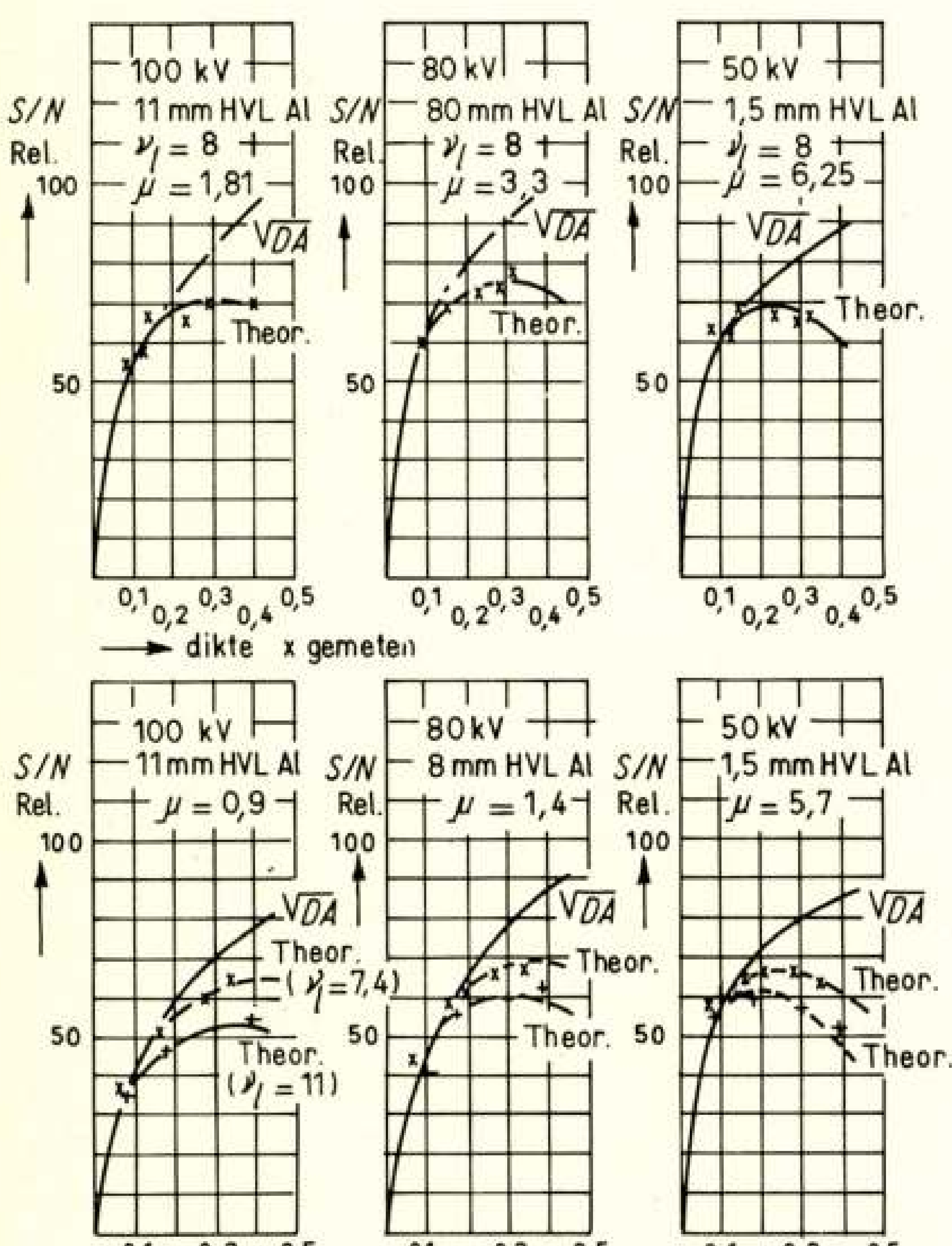


Fig. 9. Relatieve signaal-ruisverhouding voor röntgenschermen, als functie van de dikte in mm, met als parameters de stralingskwaliteit, de absorptiecoëfficiënt μ en de lichtextinctie-coëfficiënt v_1.

Empirisch is gebleken dat een dergelijk verband ook geldt voor bijv. cirkelvormige details, waarbij:

$$\nu = \frac{1}{2\Delta} \tag{3}$$

Hierin is Δ een karakteristieke dimensie van het detail dat beschouwd wordt en ν de bijbehorende ruimtefrequentie; $T(\nu)$ is de contrast- of modulatie-overdrachtsfactor, afhankelijk van ν. Deze begrippen worden in paragraaf *3.2.* verder uitgewerkt.

Eveneens als gevolg van de ruisbijdragen van de diverse conversietrappen van het systeem zal de signaal-ruisverhouding aan de uitgangszijde hoogstens gelijk, maar meestal kleiner zijn dan de S/R-verhouding aan de ingangszijde:

$$\left(\frac{S}{R} \right)_u \leq \left(\frac{S}{R} \right)_i \tag{4}$$

Voor deze achteruitgang van de S/R-verhouding kan een ruisfactor F gedefinieerd worden:

$$F = \frac{(S/R)_i^{\,2}}{(S/R)_u^{\,2}} \tag{5}$$

Een discussie van deze ruisfactor en berekening voor enkele systemen wordt in paragraaf *3.3.* gegeven.

Tenslotte kan, onder aanname van poisson-statistiek voor de temporale fluctuaties van de invallende fotonen, de signaal-ruisverhouding aan de ingangszijde geschreven worden als:

$$\left(\frac{S}{R} \right)_i = \frac{n}{\sigma(n)} = \frac{n_o \Delta^2 \tau}{\sqrt{n_o \Delta^2 \tau}} = \Delta \sqrt{n_o \tau} \tag{6}$$

Hier wordt dus genomen $(S/R)_i$ per beeldelement Δ^2 voor n_o fotonen per seconde per oppervlakte-eenheid; τ is de integratietijd van het oog ($\sim$ 0,2 s).

Invulling van (2), (5) en (6) in (1) geeft dan de volgende uitdrukking voor de detailcontrastwaarneembaarheid:

$$C_i \cdot \Delta = \frac{k\sqrt{F}}{\sqrt{n_o \tau \cdot T(v)}} \tag{7}$$

Een discussie over de bruikbaarheid van deze formule bij het vergelijken van verschillende systemen wordt in paragraaf 3.4. gegeven.

3.2. Beeldkwaliteit en modulatie-overdrachtsfunctie.

Uitgangspunt voor de nu volgende beschouwingswijze is de analogie die er bestaat tussen de lineaire-filtertheorie voor elektrische signalen en de afbeelding met een optisch of beeldversterkend systeem van 2-dimensionale intensiteitsverdelingen. Een punt van het object zal door de afbeeldende componenten niet als een punt worden afgebeeld, maar als een vlekje, waarvan de intensiteitsverdeling beschreven kan worden met de puntspreidfunctie (zie fig. 11). Is de luminantieverdeling van het object $i(x, y)$ en neemt men aan, dat de luminantieverdeling in het beeld ontstaat als de lineair onafhankelijke superpositie van de puntspreidfunctie van elk punt in het object, dan is $u(x', y')$ de luminantieverdeling van het beeld. De afwijking $e_{x,y}$ tussen object en beeld laat zich dan als volgt berekenen [17]:

$$e_{x,y} = \frac{\overline{\{i(x', y') - u(x', y')\}^2}}{i^2(x', y')} \tag{8}$$

Hierin is $i(x', y')$ het ideale beeld van het object $i(x, y)$.

In werkelijkheid geldt:

$$u(x', y') = g(x - x', y - y') \cdot i(x, y) \tag{9}$$

en, geïntegreerd over het gehele object:

$$u(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x - x', y - y') \cdot i(x, y)\, dx\, dy \tag{10}$$

Hierin is $g(x, y)$ de puntspreidfunctie; gebruik makend van fouriertransformaties kan men het verband tussen amplitude in object en beeld dan als volgt schrijven, met de ruimtefrequentie als variabele:

$$U(\omega) = T(\omega)\, I(\omega) \tag{11}$$

$U(\omega)$, $T(\omega)$ en $I(\omega)$ zijn hierin de fouriertransformaties van, resp. $u(x', y')$, $g(x, y)$ en $i(x, y)$. $T(\omega)$ is equivalent met de reeds in paragraaf *3.1.* gedefinieerde contrastoverdrachtsfactor (met $\omega = 2\pi v$).

Berekent men op deze wijze de afwijking tussen voorwerp en beeld, met ω als variabele, dan volgt:

$$1 - e_\omega = \frac{2\iint S(\omega) \cdot T(\omega)\, d\omega}{\iint S(\omega)\, d\omega} - \frac{\iint |T(\omega)|^2 S(\omega)\, d\omega}{\iint S(\omega)\, d\omega} \tag{12}$$

$S(\omega) = |I(\omega)|^2$, het vermogens- of Wiener-spectrum van het object voor ruimtelijke frequenties. Omdat $S(\omega)$ als regel niet bekend is wordt $S(\omega)$ vaak constant verondersteld binnen de bandbreedte, zodat:

$$Q = 1 - e = 2\iint T(\omega)\, d\omega - \iint |T(\omega)|^2\, d\omega \tag{13}$$

De eerste term beschrijft de beeldkwaliteit voor wat betreft de overeenkomst tussen object en beeld, de tweede term kan geïnterpreteerd worden als een equivalente bandbreedte [18].

Voor ruisvrije beelden kan men op deze manier, gebruik makend van de modulatie-overdrachtsfunctie $T(\omega)$, tot een vergelijking van verschillende systemen komen. Een optisch systeem kan hierbij beschouwd worden als een 'low-band pass'-filter voor ruimtefrequenties; voor ruimtefrequentie nul wordt de modulatie-overdracht op 100% gesteld.

Een belangrijke eigenschap van de modulatie-overdrachtsfunctie, uitslaggevend voor de adaptatie van deze terminologie, moet hier vermeld worden: onder bepaalde condities is de factor voor het totale systeem gelijk aan het produkt van de factoren van de afbeeldende componenten:

$$T_{\text{totaal}}(v) = T_1(v) \cdot T_2(v) \cdot \ldots \cdot T_n(v) \tag{14}$$

Ter illustratie is in fig. 12 de modulatie-overdrachtsfunctie van een röntgen-beeldversterker gegeven en de functies van de afzonderlijke componenten. Verticaal is hier gegeven de modulatie-overdracht in %, horizontaal de ruimtefrequentie in lp/mm op het röntgenscherm (vergroting van de buis is ca. 0,09). Wat als regel het oplossend vermogen genoemd wordt komt overeen met de ruimtefrequentie, waarbij de modulatie-overdracht circa 2% bedraagt.

Tenslotte is in fig. 13 de modulatie-overdrachtsfunctie gegeven van een bij Philips ontworpen helderheidsversterker met vezeloptiek-ingangs- en uitgangsvenster, vergroting 1 en een nuttige fotokathode-diameter van 25 mm.

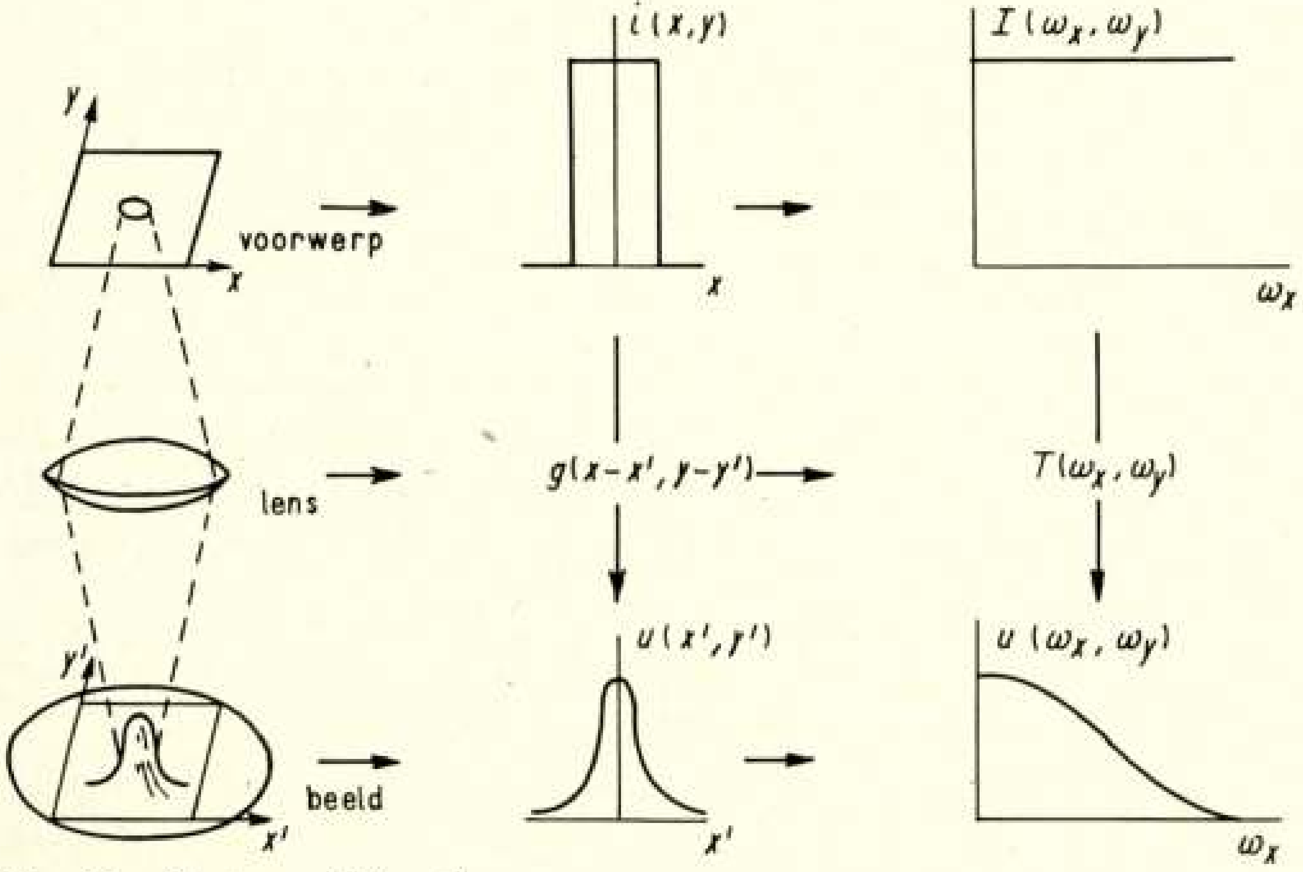


Fig. 11. Puntspreidfunctie.

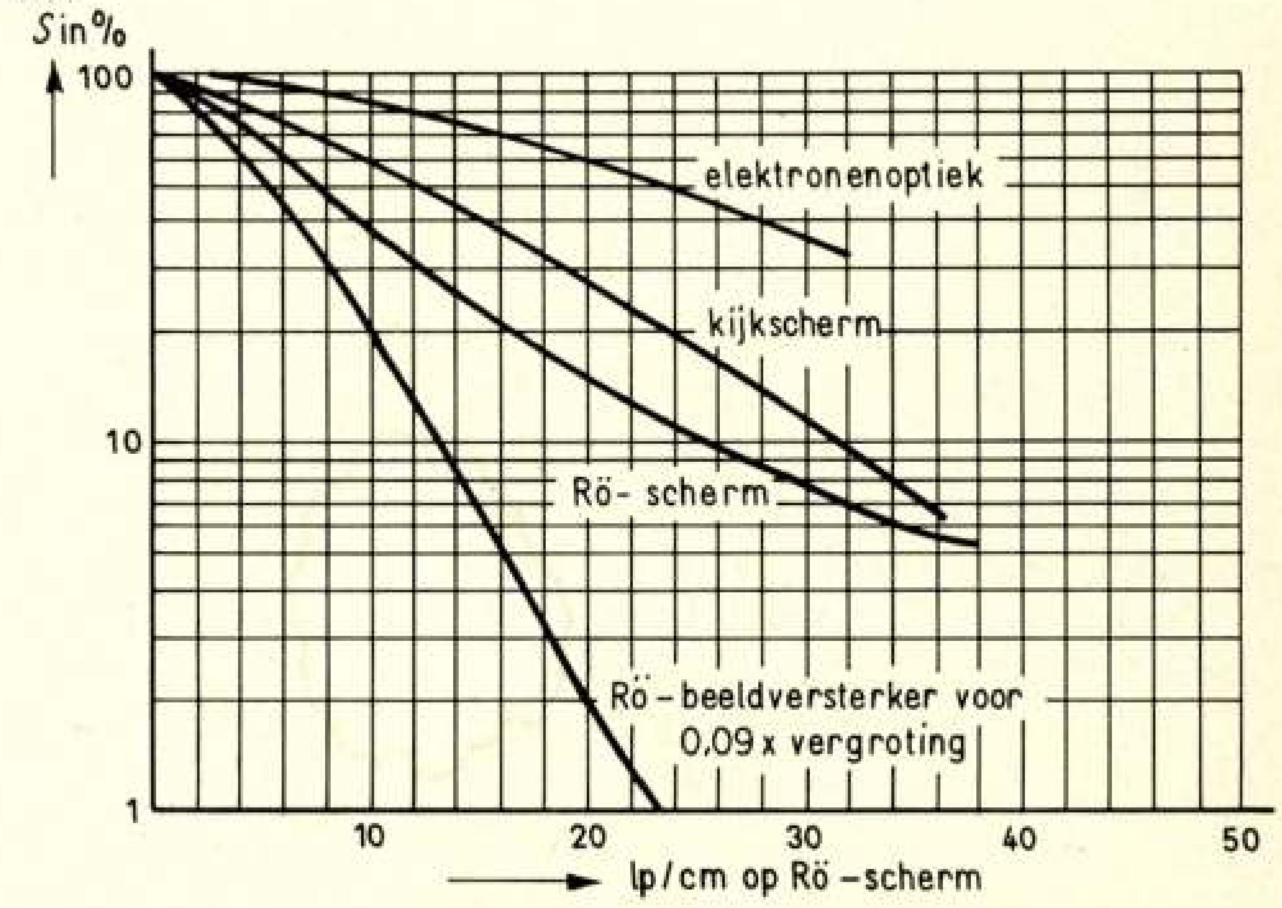


Fig. 12. Modulatie-overdrachtsfunctie van een röntgen-beeldversterker en van de componenten.

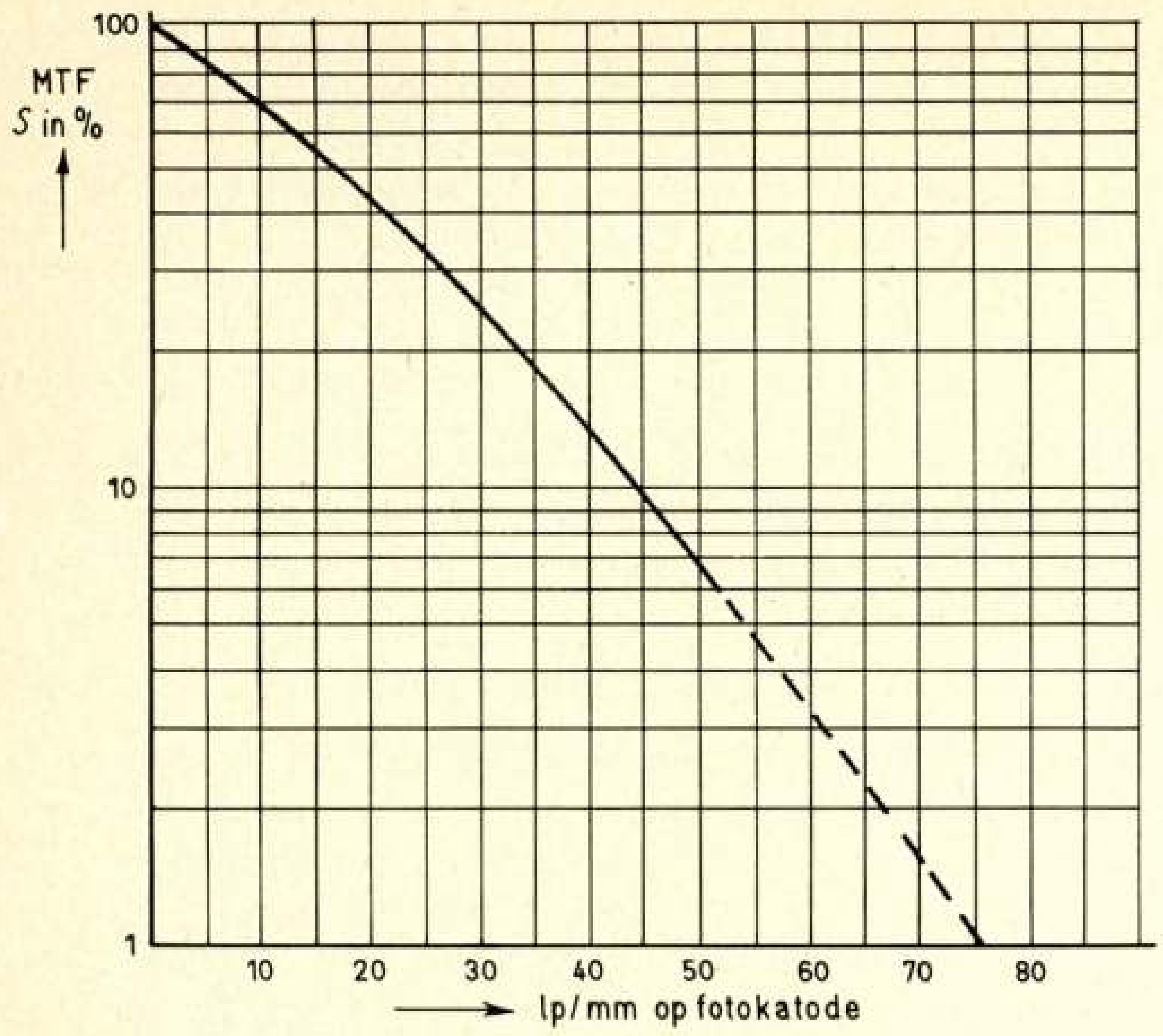


Fig. 13. Modulatie-overdrachtsfunctie van een helderheidsversterker voor zichtbaar licht met vezeloptiek-ingangs- en uitgangsvenster.

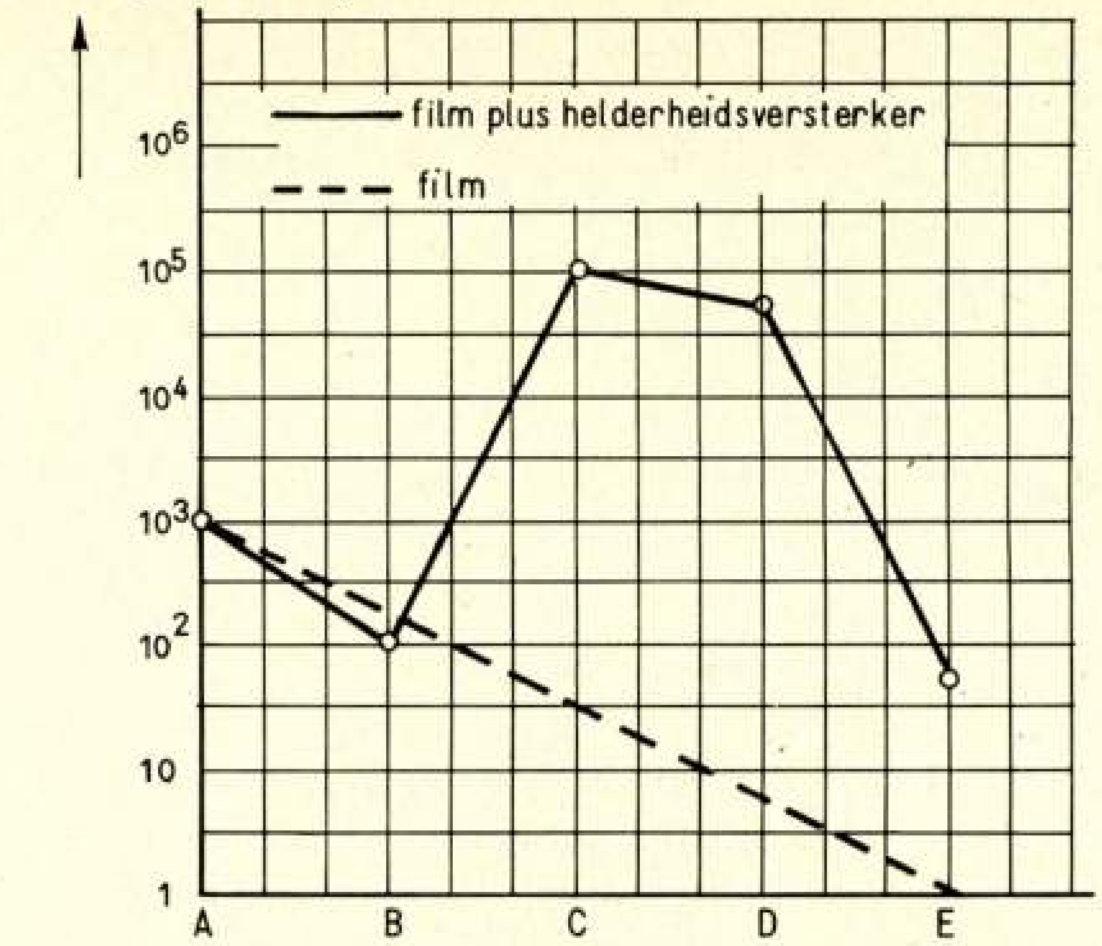


Fig. 14. Aantal werkzame deeltjes in verschillende stadia van het afbeeldingsproces, voor helderheidsversterker plus film en voor film alleen.

3.3. Ruisfactor F

In vergelijking (5) is de ruisfactor gedefinieerd als de verhouding van het signaal-ruisvermogen aan uit- en ingangszijde. Voor de bepaling van de ruisfactor is het noodzakelijk, de bijdrage tot de ruis van elke component van het systeem te beschouwen. Van belang zijn dan de veranderingen van de deeltjesstromen t.g.v. de werking van de componenten.

In fig. 14 is een voorbeeld gegeven, hoe de ruisfactor verbeterd kan worden door gebruik te maken van beeldversterking; in deze figuur is het aantal werkzame deeltjes (fotonen, elektronen, filmkorrels) per trap gegeven voor een film alleen en voor de combinatie film plus helderheidsversterker (vezeloptiekkoppeling). Onderscheidenlijk zijn:

- A: Aangenomen aantal invallende fotonen.
- B: Aantal foto-elektronen in de helderheidsversterker, bij 10 % quantumrendement van de fotokathode.
- C: Aantal fotonen uit de kijkschermfosfor.
- D: Aantal fotonen uit het kijkvenster; bij gebruik van een vezeloptiek-uitgangsvenster vindt enig transmissieverlies plaats.
- E: Aantal gezwarte korrels, voor film alleen en voor film plus helderheidsversterker, met 0,1 % quantumrendement van de film (zwarting 1).

De signaal-ruisverhouding aan de uitgang, bij poisson- en/of binomiale statistiek voor de trappen, wordt nu bepaald door het minimum aantal deeltjes dat ergens in een trap voorkomt en dus door de fluctuatie van dat aantal. Voor film alleen is dat situatie E, zodat de ruisfactor F hier uitsluitend bepaald wordt door het quantumrendement van de film. Voor de combinatie film plus helderheidsversterker is bij zowel B en E het aantal deeltjes het kleinst; de ruisfactor F wordt hier dus in hoofdzaak bepaald door zowel het quantumrendement van de fotokathode als het quantumrendement van de film. In deze situatie is een verdere verbetering (verlaging) van F met 2 te bereiken door meer versterking te gebruiken, zodat E duidelijk hoger dan B komt te liggen.

Men kan dit ook meer kwantitatief behandelen door de statistiek van de deelnemende processen te beschouwen. Behalve de binomiale verdeling komen andere verdelingen voor, waarbij de poisson-verdeling de belangrijkste is. *Albrecht* [19] heeft laten zien, dat bij opeenvolging van poisson- en binomiale processen de poisson-statistiek geldt voor de samenvoeging van de voorafgaande poissontrap met de navolgende binomiale trap; in fig. 15 is een dergelijke opeenvolging van processen weergegeven. Hierin is p_o het aantal invallende fotonen, p_i, resp. b_i, zijn de versterkingsfactoren voor de processen met een poisson-, resp. binomiale verdeling. Dan geldt:

$$p_i \cdot b_i = a_i \tag{15}$$

$$\sigma^2 (p_i \cdot b_i) = \sigma^2 (a_i) = a_i \tag{16}$$

Voor de standaardafwijking aan de uitgang van het systeem geldt dan:

$$\sigma_u^2 = \sigma^2 (a_0) (a_i a_2 \ldots\ldots a_n)^2 + \\ + a_0 \sigma^2 (a_1) (a_2 a_3 \ldots\ldots a_n)^2 + \\ + a_0 a_1 \sigma^2 (a_2) (a_3 a_4 \ldots\ldots a_n)^2 + \ldots\ldots \tag{17}$$

Voor de ruisfactor – zie vergelijking (5) – kan dan afgeleid worden:

$$F = \frac{1}{b_o} \left\{ 1 + \frac{\sigma^2 (a_1)}{{a_1}^2} + \frac{\sigma^2 (a_2)}{a_1 {a_2}^2} + \frac{\sigma^2 (a_3)}{a_1 a_2 {a_3}^2} + \ldots\ldots \right\} \tag{18}$$

Met $\sigma^2 (a_i) = a_i$:

$$F = \frac{1}{b_o} \left(1 + \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_1 a_2} + \frac{1}{a_1 a_2 a_3} + \ldots\ldots \right) \tag{19}$$

Enkele voorbeelden van de berekening van de ruisfactor F zullen gegeven worden, waarbij deze berekening beperkt zal worden tot de beeldversterker zelf, zonder de eventuele invloed op F van de visuele waarneming of van de waarneming met een

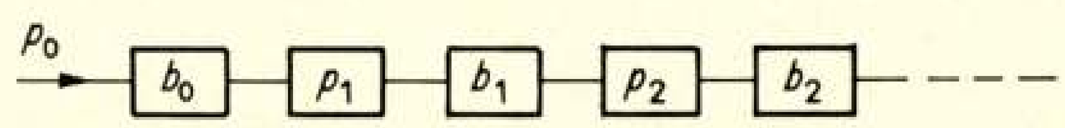


Fig. 15. Opeenvolging van processen met poisson-, resp. binomiale waarschijnlijkheidsverdelingen; p_o is de grootte van de invallende fotonenstroom, p_i, resp. b_i, zijn versterkingsfactoren per proces.

TV-camerabuis. Deze invloed is klein als de totale versterking van het systeem voldoende groot is (vgl. fig. 15). De noodzakelijke versterking hiervoor kan vrij eenvoudig berekend worden aan de hand van vergelijking (19). Bij gebruik van een camerabuis moet bijv. de versterking zo groot zijn, dat de (versterkte) foto-elektronenruis groot is t.o.v. de equivalente ruisstroom van de camerabuis.

3.3.1. Röntgen-beeldversterker. De volgende processen met bijbehorende factoren p_i, b_i zijn aanwezig:

$p_o = n_o$ Rö-quanta/(cm^2 · s).
$b_o = A$, 0,2 à 0,6
$p_1 =$ Aantal fotonen per geabsorbeerd röntgen-quant; $p_1 \approx 10^3$
$b_1 =$ Aantal foto-elektronen per foton; $b_1 \approx 0{,}1$
$p_2 =$ Aantal fotonen per foto-elektron op het kijkscherm; $p_2 \approx 1000$

$$F = \frac{1}{b_o}\left(1 + \frac{1}{10^2} + \frac{1}{10^5}\right)$$

De ruisfactor wordt hier vrijwel volledig bepaald door de absorptie van het ingangsscherm; deze absorptie hangt uiteraard sterk af van de stralingskwaliteit en schermdikte (zie fig. 9).

3.3.2 Helderheidsversterker. Hiervoor geldt:

$p_o = n_o$ fotonen/opp.eenh./s.

$b_o =$ Aantal foto-elektronen per invallend foton; $b_o \approx 0{,}1$

$p_1 =$ Aantal fotonen per foto-elektron; $p_1 \approx 1000$

$$F = \frac{1}{b_o}\left(1 + \frac{1}{1000}\right)$$

Hier wordt F geheel bepaald door het quantumrendement van de fotokathode; dit verklaart het belang van de gevoelige trialkali-fotokathode in helderheidsversterkers. Voor blauw licht bijv. kan het quantumrendement 20% en hoger zijn (zie fig. 3). Zoals hierboven reeds genoemd is, is de berekening van F beperkt tot de beeldversterker zelf. Treedt bijv. bij waarneming van het kijkscherm met een oculair veel verlies op in het aantal fotonen dat het netvlies emitteert, dan kan de term tussen haken bijdragen tot de uiteindelijke ruisfactor.

3.3.3. Channel multiplier. In dit geval vindt vermenigvuldiging van de foto-elektronen plaats in een matrix van zeer vele, dunne glazen buisjes. Wanneer over een dergelijke matrix een spanning geplaatst wordt kan, via secundaire emissie op de zijwanden van de buis, een foto-elektron aanleiding geven tot een groot aantal elektronen aan de uitgang, die vervolgens versneld worden naar een kijkschermfosfor. Ten gevolge van het beperkte open oppervlak en de bij benadering exponentiële waarschijnlijkheidsverdeling van het vermenigvuldigingsproces, is de ruisfactor ruim 3 maal zo groot als bij een normale helderheidsversterker:

$p_o = n_o$ fotonen/(opp. eenh. · s)
$b_o =$ aantal foto-elektronen per invallend foton; $b_o \approx 0{,}1$
$\theta =$ fractie foto-elektronen in matrix; $\theta \approx 0{,}7$
$p_1 =$ elektronenvermenigvuldiging; $p_1 \approx 1000$. Statistiek bij benadering exponentieel, waarvoor geldt:

$\sigma^2(p_i) = p_i^2$

$b_1 = 1$

$p_2 =$ aantal fotonen per elektron op het kijkscherm; $b_2 \approx 1000$

$$F = \frac{1}{b_o\theta}\left(2 + \frac{1}{a_1\,a_2}\right) = \frac{3}{b_o}$$

3.4. Bruikbaarheid van C · Δ-formule
Het gebruik van vergelijking (7) voor vergelijking van hoogversterkende afbeeldende systemen moet met voorzichtigheid gebeuren; zo is bijv. in vergelijking (1), waarop (7) teruggaat, de aanname van de integrerende werking van het oog verwerkt. Dit nu is een eenvoudige uitdrukking voor een complex proces. Wij hebben nl. bij deze hoogversterkende systemen vaak de situatie, waarbij binnen datgene wat als detail herkend wordt toch afzonderlijke ruisimpulsen zichtbaar zijn. Het is daarom waarschijnlijk dat deze integrerende werking geen retinaal, maar een corticaal effect is.

Verder beschrijft deze vergelijking, zoals reeds in paragraaf *3.1.* genoemd, in hoofdzaak signaal-detectie van geïsoleerde, bekende details en zeker niet het herkennen van beelden met een hoge informatie-inhoud die in werkelijkheid voorkomen. In dit verband is ook de hypothese van de lineair onafhankelijke superpositie van puntbeelden, gebruikt bij de introductie van lineaire filtertheorie en modulatie-overdrachtsfunctie (paragraaf *3.2.*), zelfs voor de retina al niet juist (*Mach*-fenomeen, *Hermann*-illusie, zie fig. 16). Behalve de reeds genoemde integrerende werking werken andere processen aan de besluitvorming mee, zoals selecteren, correleren, daarbij gebruik makend van voorinformatie zoals ervaring, training en perceptieve eigenschappen van zichtbare ruisimpulsen.

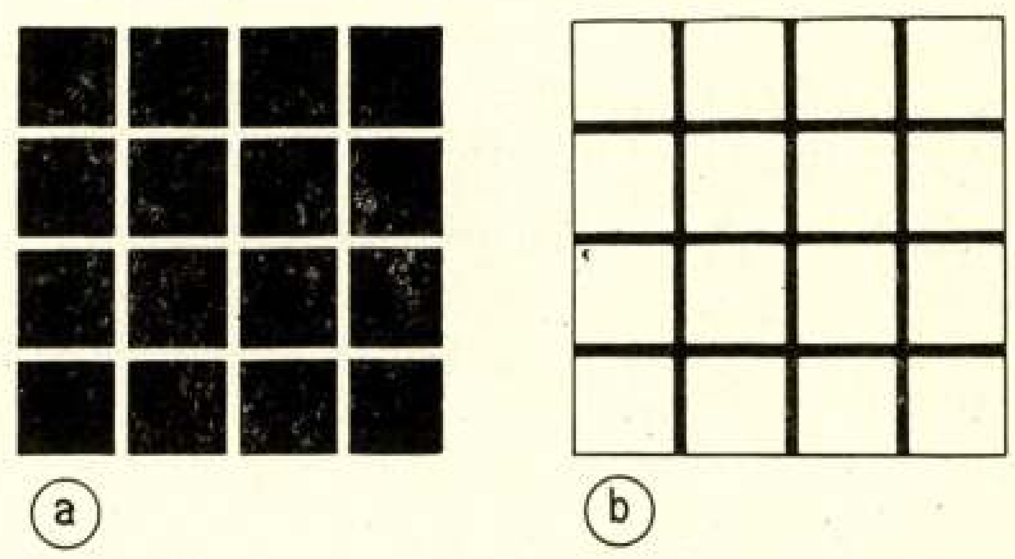


Fig. 16. Visuele illusie van *Hermann.* Wordt op een willekeurig kruispunt gefixeerd, dan lijken de er omheen liggende kruispunten in het linker beeld donkerder, in het rechter beeld lichter dan de doorlopende banen.

De vraag naar wat een systeem waard is kan daarom maar zeer ten dele beantwoord worden door gebruik te maken van de $C \cdot \Delta$-formule; de vraagstelling is in feite: welke gemiddelde waarschijnlijkheid heeft een geoefende waarnemer om met een bepaald systeem tot een juist besluit over het object te komen? Deze vraag is bijzonder complex; zij is voorlopig niet eenduidig te beantwoorden.

Het beste wat bruikbaar is voor een objectieve omschrijving is echter, zoals genoemd in paragraaf *3.1.*, het gebruik van concepten als modulatie-overdrachtsfunctie en ruisfactor. Men kan hiermede wezenlijke parameters aangeven, hoewel niet altijd de invloed op de visuele waarneming bekend is.

4. Toepassingen

4.1. Röntgen-beeldversterking
Deze toepassing is een van de oudste; zij vindt algemeen gebruik in de röntgen-diagnostiek. Röntgen-beeldversterkers worden daarbij toegepast, zowel voor directe waarneming vanaf het kijkvenster als voor enkelbeeld-cinefilm- en TV-opnamen. De quantumversterking van de beeldversterker is daarbij zo groot, dat ieder geabsorbeerd röntgen-quant een detecteerbaar signaal oplevert. Dit heeft geleid tot een sterke uitbreiding van

de medische diagnostische mogelijkheden en technieken, met als kenmerkende overgang die van morfologisch naar steeds meer fysiologisch onderzoek.

4.2. Infrarood-beeldversterking
Deze toepassing bestaat ook reeds een aantal decennia, vooral voor militaire doeleinden. Door middel van infrarood-verlichting en beeldversterking is het mogelijk, 's nachts scènes zichtbaar te maken, die voor het ongewapende oog niet direct waarneembaar zijn.

4.3. Helderheidsversterking in de elektronen-microscopie
Bij deze recente toepassing wordt tussen het fluorescentiescherm en de TV-camerabuis een helderheidsversterker geplaatst. Bij de gebruikelijke interne fotografie zijn bundelstromen van ca. 10^{-11}A/cm^2 nodig. Gebruik van een helderheidsversterker en TV-camera maakt fotografie van het monitorbeeld mogelijk bij bundelstromen tot een benedengrens van ca. 10^{-14}A/cm^2 (met integratie 10^{-15} A/cm^2), dus bij een aanzienlijk lagere preparaatbelasting [20, 21].

4.4. Ultra-snelle fotografie
Beeldversterkers worden gebruikt als zeer snelle sluiter en voor het maken van zgn. 'streak'-opnamen.

4.5. Endescoop-enthescoop
Met een beeldversterker plus TV-camera kan via een zgn. enthescoop een natuurgetrouw beeld van bijv. een maquette op kleine schaal verkregen worden. Via zeer kleine lensjes kan op deze manier een bruikbaar beeld ontstaan.

4.6. Omzetting snelle signalen in computer-geheugen
Zeer snelle verschijnselen ($\tau \ll 1\,\mu$s) kunnen als regel niet via een analoog-digitaal-converter in het geheugen van een computer vastgelegd worden. Dit lukt wel door het verschijnsel als oscilloscoop-beeld op te nemen met een helderheidsversterker en TV-camerabuis. Het signaal blijft als ladingsbeeld voldoende lang in de gevoelige laag van de camerabuis om analoog-digitaal-conversie te kunnen toepassen. Helderheidsversterking van het zeer snelle en daardoor lichtzwakke oscilloscoop-beeld is hierbij noodzakelijk.

4.7. Zichtbaarmaking van röntgen-diffractie-diagrammen
Wordt op de vlakke vezeloptiek-ingangszijde een fosforlaag aangebracht, dan is de mogelijkheid aanwezig om op het kijkscherm of TV-monitorbeeld een röntgen-diffractie-patroon (ook voor zachte röntgenstralen) direct zichtbaar te maken. Het is dan in principe mogelijk het uitrichten van kristallen – dat nu gebeurt door het achtereenvolgens maken van fotografische opnamen in diverse standen en dat zeer tijdrovend kan zijn – te vervangen door 'on-line', 'real-time' uitrichten in aanzienlijk kortere tijd.

4.8. Oogonderzoek
Door middel van helderheidsversterkers kan het netvlies zichtbaar gemaakt worden op een TV-monitor, bij lage verlichtingssterkte op het netvlies. Men is dan aanzienlijk minder beperkt voor wat betreft de adaptatie-toestand, resp. verblinding en pupildiameter. De eerste proeven voor deze toepassing hebben de bruikbaarheid duidelijk aangetoond.

4.9. Waarneming van akoestische golffronten
Bij het stroboscopisch waarnemen van akoestische golffronten in lucht is de levensduur van de flitslamp een probleem. Gebruik van een helderheidsversterker biedt de mogelijkheid, de lichtsterkte van de flitslamp te verlagen ter verbetering van de levensduur en tevens tot het gebruik van nog kortere belichtingstijden.

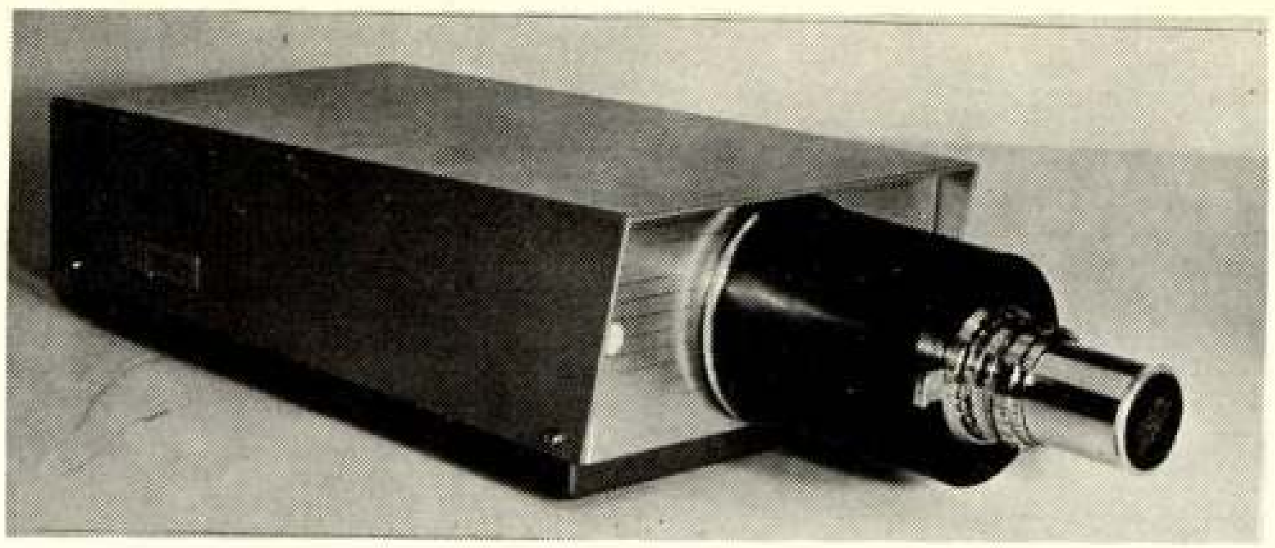


Fig. 17. TV-camera, voorzien van een Plumbicon camerabuis met vezeloptiek-ingangsvenster, gekoppeld met een helderheidsversterker met vezeloptiek-ingangs- en uitgangsvensters.

4.10. Astronomische toepassingen, satellieten
Vaak, als te lange belichtingstijden een probleem vormen (luchtturbulentie, trillingen, veranderlijke verschijnselen, *Schwarzschild*-effect), kan een nuttig gebruik gemaakt worden van een helderheidsversterker. Hoewel helderheidsversterkers met magnetische focussering voor dit doel reeds gebruikt zijn, is minder ervaring beschikbaar met elektrostatisch gefocusseerde buizen.

Gedacht wordt bijv. aan het waarnemen van zwakke sterren en van snel veranderende spectra; in andere gevallen is het gewenst, de beschikking te hebben over TV-signalen (ruimteobservatorium, e.d.) en is voorversterking d.m.v. helderheidsversterking nodig.

4.11. Televisie-camera met helderheidsversterker voor lage lichtniveaus
In fig. 17 is tenslotte een foto gegeven van een televisie-camera met Plumbicon opname-buis, waarvoor één helderheidsversterker; de koppeling vindt plaats met vezeloptiek-vensters (zie ook fig. 7). Met dit systeem zijn een aantal van de bovengenoemde toepassingen op bruikbaarheid onderzocht; in principe is een dergelijke combinatie bruikbaar in alle gevallen, waar ongunstige verlichtingscondities het werken met een normale TV-camera bemoeilijken. Voorversterking met twee helderheidsversterkers in cascade is eveneens mogelijk wanneer hoge versterking wordt vereist (met uiteraard consequenties voor de modulatie-overdrachtsfunctie (zie paragraaf *3.2.*)).

Literatuur

[1] M. C. Teves en T. Tol: Elektronische versterking van röntgenbeelden; Philips Techn. Tijdschrift **14**, 1952, blz. 65.

[2] B. Combée, P. J. M. Botden und W. Kühl: Fortschritte in der Bildverstärkung, I.C.R. Montreal, 1962; Röntgenstrahlen **2**, 1962, p. 5.

[3] H. V. Soule: Electro-Optical Photography at Low Illumination Levels; *Wiley*, New York, 1968.

[4] A. H. Sommer: Photo-emissive Materials; *Wiley*, New York, 1968.

[5] J. J. Scheer and J. van Laar: GaAs-Cs: A New Type of Photoemitter; Solid State Communications **3**, 1965, p. 189.

[6] P. Schagen, H. Bruining and J. C. Francken: A Simple Electrostatic Electron-Optical System with only one Voltage; Philips Res. Repts. **7**, 1952, p. 119.

[7] W. Kühl and J. W. D. van Overhagen: A 9-inch X-ray Image Intensifier with Variable Magnification; Medica Mundi **11**, 1965, p. 1.

[8] N. S. Kapany: Fiber Optics; Academic Press, New York, 1967.

[9] A. Rose: Sensitivity of the eye on an absolute scale; J. Opt. Soc. Amer **38**, 1948, p. 196.

[10] W. Kühl, A. Geurts and J. W. D. van Overhagen: Information Transfer with High-Gain Image Intensifiers; Proc. 4th Symp.

Photo-Electronic Image Devices; Adv. Electr. Electron Physics **28B**, 1969, p. 615.

[11] W. Kühl und J. Pennings: Beurteilung der Bildgüte von Bildverstärkern; Symp. Bildgüte, Herrenchiensee, Okt. 1967.

[12] H. R. Blackwell: Contrast Thresholds of human eye; J. Opt. Soc. Amer. **36**, 1946, p. 624.

[13] W. Kühl: Information Transfer with Image Intensifier Systems, Ch. XIII, p. 222 ... 239, 'Diagnostic Radiologic Instrumentation'; ed. *Mosely, R. D. and Rust, J. H., C. C. Thomas*, Springfield, U.S.A., 1965.

[14] O. H. Schade: An evaluation of photographic image quality and resolving power; J. Soc. Motion Picture and Television Engrs. **73**, 1964, p. 81.

[15] J. W. Coltmann and A. E. Anderson: Noise Limitations of Resolving Power in Electronic Imaging; Inst. Rad. Eng. **48**, 1960, p. 858.

[16] C. Albrecht and J. Proper: Detail Rendition in X-ray Images; Medica Mundi **11**, 1965, p. 44.

[17] W. Kühl: A critical Review on Methods of Image Evaluation in Television; 'Diagnostic Radiology', ed. *Mosely, R. D. and Rust, J. H.*, Aesculapius Publishing Comp., Birmingham, U.S.A., 1969, p. 334 ... 356.

[18] O. H. Schade: Electro-Optical Characteristics of Television Systems; R.C.A. Review **9**, 1948, p. 491.

[19] C. Albrecht: Noise Sources in Image Intensifying devices, p. 291 ... 311, 'Diagnostic Radiologic Instrumentation'; ed. *Mosely, R. D. and Rust, J. H., C. C. Thomas*, Springfield, U.S.A., 1965.

[20] H. F. Premsela: A Versatile T.V. Image Display System for Electron Microscopy using an Image Intensifier and a Plumbicon Pick-up Tube with Fiber Optics Window; Philips Bulletin on Scientific and Analytical Equipment, October 1968.

[21] W. Kühl: Information Transfer with Electron Microscope T.V. Systems; Philips Bulletin on Scientific and Analytical Equipment, October 1968.

629.19.621.395:621.397

Ontwerp voor een Europees satellietsysteem voor telefonie en TV-distributie

door ir. R. Viddeleer, Dr. Neherlaboratorium, Leidschendam



Summary: *Survey of a European Satellite System for Telephony and Television.*
A general survey is given of a European satellite sytem for telephony and television. This system is the result of a joint ESRO-CEPT study carried out in January and February 1970. In the introduction some reasons are given for the fact that either a telephony-only or a television-only satellite are not economically viable.
Section 2 deals with a short description of the telecommunications part of a combined telephony and television satellite, a map of the possible coverage zone, the choice of satellite mass and power and a description of the required earth stations.
Section 3 compares the available satellite transmission capacity with the traffic requirements.
Section 4 deals with the launch policy; Section 5 deals with a smaller experimental satellite which is supposed to precede the large operational satellites.

1. Inleiding

Sinds enige jaren worden studies verricht ter beantwoording van de vraag of een satelliet voor het intereuropese telefoonverkeer economisch verantwoord zou kunnen zijn. Parallel hieraan werd door EBU (European Broadcasting Union) begroot, wat de jaarlasten van de door haar gewenste televisie-capaciteit (twee permanent beschikbare TV-kanalen tussen alle actieve EBU-partners) zouden zijn, indien hiervoor van straalverbindingen gebruik wordt gemaakt. Tevens werd door EBU tezamen met ESRO (European Space Research Organization), berekend wat een satellietsysteem voor deze voorziening zou kosten. Uit de bovenvermelde studies is gebleken, dat dergelijke satellietsystemen er, voor wat de economische zijde betreft, niet erg hoopvol uitzien en wel om de volgende redenen:

Voordracht, gehouden voor het Genootschap van Ingenieurs der PTT en voor de Sectie Telecommunicatie van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs op 28 april 1970.

– Een telefonie-satelliet voor transport van het intereuropese verkeer is bij gegeven capaciteit qua prijs vergelijkbaar met Intelsat-satellieten van dezelfde capaciteit, doch de gemiddelde lengte van de verbindingen in Europa is veel kleiner dan in het zgn. 'global system'. Als voorbeeld diene dat, indien in Europa alleen de verbindingen langer dan 1 200 km worden beschouwd, de gemiddelde lengte daarvan slechts 1 554 km bedraagt. Hierdoor worden de kosten per circuit-kilometer hoog, vergeleken met die voor alternatieve oplossingen (kabel- en straalverbindingen).

– Een zuivere televisie-satelliet voor slechts twee TV-programma's heeft, uit telecommunicatie-oogpunt bezien, een geringe transmissie-capaciteit (qua vermogen en bandbreedte vergelijkbaar met ongeveer 800 telefonie-circuits). Hierdoor spelen de vaste lasten (grondstations met grote paraboolantennes, enz.) een zo grote rol, dat er van concurrentie met straalverbindingen geen sprake kan zijn.

Met deze achtergrond als uitgangspunt is onlangs besloten, de belangen van de beide gebruikers (CEPT en EBU) te bun-

delen en tot een Europees satellietsysteem voor telefonie en televisie te komen. Hiervoor is een subwerkgroep opgericht, met deelnemers van CEPT[1]), ESRO en EBU; deze groep, waarvan schrijver dezes deel heeft uitgemaakt, heeft in Noordwijk in de periode van 19 januari ... 6 februari 1970 een technische en economische studie voor een gecombineerd Europees satellietsysteem verricht. Een globale technische beschrijving van dit systeem volgt hieronder.

2. Globale technische beschrijving van het satellietsysteem

2.1. Frequenties

Voor de frequenties van grondstation naar satelliet (up-link) en van satelliet naar grondstation (down-link) wordt gebruikgemaakt van twee 500 MHz brede frequentiebanden tussen 10 en 14 GHz. Een exclusieve band voor de down-link is niet strikt noodzakelijk, doch voor toekomstige systemen met hoge flux wellicht gewenst; de definitieve toewijzing van frequentiebanden voor deze toepassing zal op de WARC (World Administrative Radio Conference) in 1971 geschieden. Een voorlopig Europees voorstel wenst voor de down-link de band van 11,45 tot 11,95 GHz en voor de up-link die van 12,75 tot 13,25 GHz. Deze keuze biedt enerzijds voldoende 'snij-ruimte' voor filters in de satelliet, terwijl anderzijds de bandbreedte van de satellietantenne (één antenne voor zenden en ontvangen) niet extreem groot behoeft te zijn, hetgeen het ontwerp iets vereenvoudigt.

2.2. Verzorgingsgebied

In fig. 1 is de gekozen bedekking van Europa, Noord-Afrika en het Nabije Oosten aangegeven; de getrokken contour geldt voor telefonie, de gestippelde kromme voor televisie. Voor deze bedekkingen is in principe een 3-dB bundelbreedte van de satellietantenne van 5 × 3° vereist. Indien rekening wordt

[1]) CEPT = Conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications.

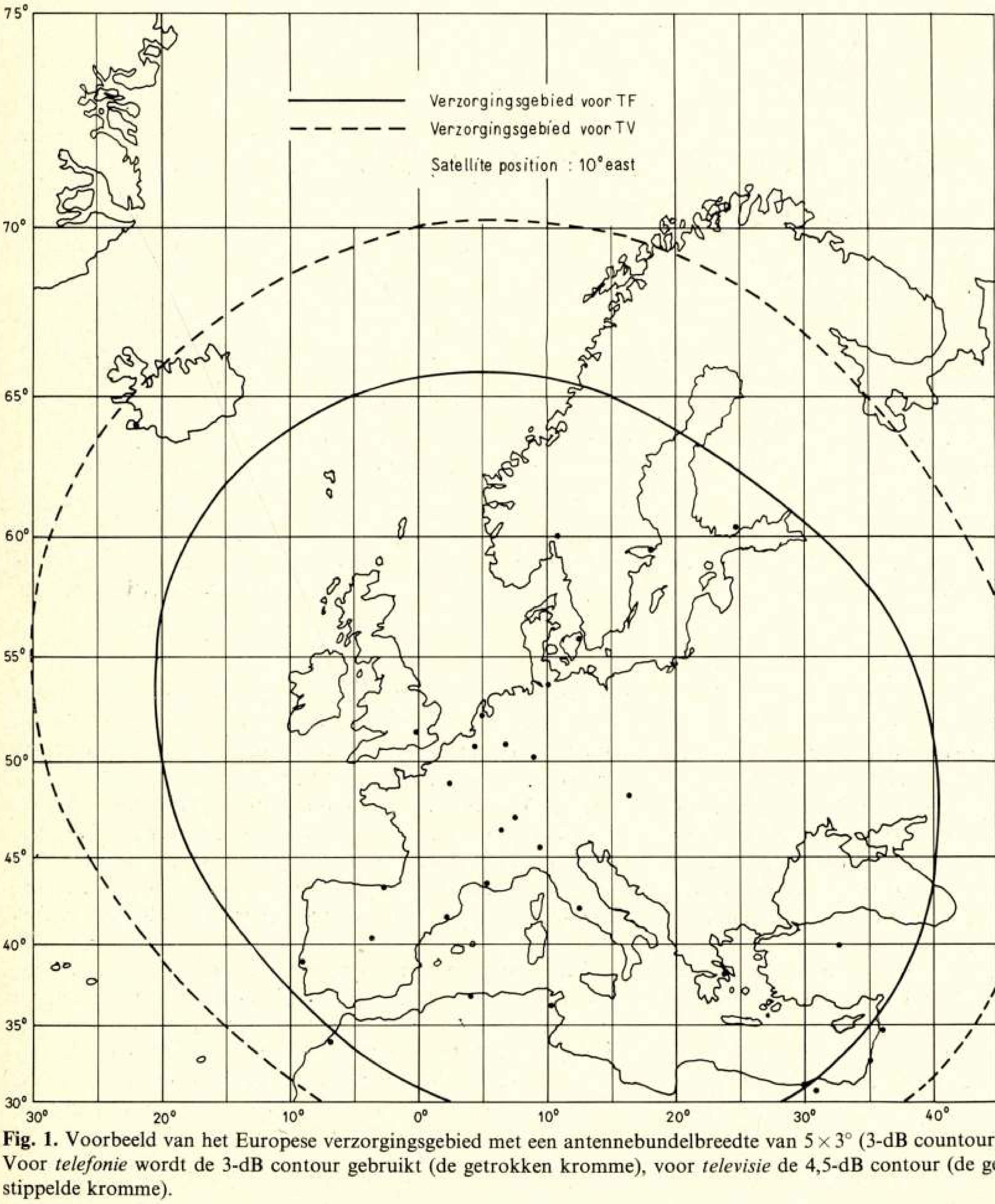


Fig. 1. Voorbeeld van het Europese verzorgingsgebied met een antennebundelbreedte van 5 × 3° (3-dB countour). Voor *telefonie* wordt de 3-dB contour gebruikt (de getrokken kromme), voor *televisie* de 4,5-dB contour (de gestippelde kromme).

gehouden met een stand-onnauwkeurigheid van de satelliet van $+ 0{,}5°$ wordt de vereiste 3-dB bundelbreedte $6 \times 4°$.

De grondstations op de getrokken contour voldoen dan juist aan de CCIR[2)]-ruiseisen voor telefonie, terwijl stations op de gestippelde contour ($\approx$ 4,5 dB breedte) juist de door EBU gestelde signaal-ruisverhoudingseis voor televisie bereiken.

2.3. Satellietmassa en -vermogen

De keuze van de satellietmassa hangt ten nauwste samen met twee factoren:

a. De beschikbaarheid van een geschikte lanceerraket (Europa III, Atlas Centaur, Titan 3B).

b. Het benodigde zendervermogen van de satelliet, rekening houdend met de beperkte beschikbare bandbreedte van 500 MHz; voor het gelijkstroomvermogen, beschikbaar aan boord van een satelliet, geldt de vuistregel dat dit ca. W/kg satellietmassa bedraagt. Rekening houdend met het stroomverbruik van de hulpapparatuur (telemetrie, enz.) en een conversierendement van DC- naar HF-vermogen van ca. 20%, blijkt per kilogram satellietmassa ca. 180 mW HF-vermogen te kunnen worden opgewekt.

De onder a en b genoemde factoren blijken te resulteren in een satellietmassa van ca. 450 kg. Het aldus beschikbare HF-vermogen van ca. 80 W wordt verdeeld over 12 transponders met een bandbreedte van 40 MHz (36 MHz nuttige bandbreedte) en een vermogen van 7 W elk. Deze keuze is gemaakt omdat met een bandbreedte van 36 MHz en een vermogen van 7 W juist de vereiste TV-kwaliteit kan worden verkregen. Deze eis is maatgevend, daar bij gebruik van de transponders voor telefonie enige flexibiliteit aanwezig is door het nog vrij te kiezen aantal telefoonkanalen per transponder.

2.4. Karakteristieken van de grondstations

De 20 grondstations voor telefonie en televisie kunnen op diverse wijzen worden uitgevoerd; oorspronkelijk werd gedacht aan een uitvoering met een ongekoelde parametrische versterker en een parabool-antenne met een diameter van 13 m.

In de loop van de technische studie werd duidelijk, dat het gebruik van een gekoelde parametrische versterker en een antenne-diameter van 15 m bij het gegeven satellietvermogen en de gegeven bandbreedte een aanzienlijke winst in capaciteit oplevert, terwijl de meerprijs per grondstation gering is. Voor verdere economische studie is de definitieve keuze tussen beide uitvoeringsvormen nog open gelaten; in beide gevallen is – i.v.m. de kleine bundelbreedte van de grondstations-antenne ($\approx 0{,}12°$) – een hoogwaardig volgsysteem nodig.

Door toepassen van het 'multidestination'-principe heeft ieder grondstation voor telefonie slechts één zendereindtrap met een vermogen van 1 kW nodig. Voor televisie is een tweede eindtrap van hetzelfde vermogen nodig, terwijl een derde eindtrap als reserve voor beide dienst doet. Het aantal ontvangketens (zonder reserve) is gelijk aan het aantal tegenposten; het bedraagt gemiddeld 7 voor telefonie en 2 voor televisie. Om betrouwbaarheidsredenen is iedere ontvangketen verdubbeld.

3. Capaciteit van het systeem

De capaciteit, d.w.z. het aantal circuits, van het satellietsysteem is afhankelijk van het type grondstation (13-m antenne met ongekoelde parametrische versterker of 15-m antenne met gekoelde versterker) en van de gebruikte modulatie-methode.

Voor FM/FDMA (frequency modulation, frequency division multiple access) is een vullingsgraad van 67% verondersteld, voor PCM/TDMA (pulse code modulation, time division multiple access) 90%. Tabel 1 geeft voor de twee typen grondstations en de beide modulatie-methoden de capaciteit van het satellietsysteem in aantallen telefooncircuits weer. Hierbij is verondersteld, dat van de 12 transponders er 2 voor televisie worden gereserveerd; de vermelde capaciteit is dus inclusief 2 TV-programma's.

Tabel 1. Capaciteit van het satellietsysteem voor verschillende typen grondstations en verschillende modulatie-methoden.

Type grondstation	Modulatie	
	PCM/TDMA	FM/FDMA
13 m, ongekoeld	2500	1800
15 m, gekoeld	4000	2130

Hierbij kan een vergelijking worden gemaakt tussen de beschikbare satellietcapaciteit en de verkeersbehoefte op de verbindingen (langer dan 1200 km) in de periode 1980 ... 1990. Hierbij is voor 1975 een behoefte aan 2300 verbindingen berekend en geëxtrapoleerd naar de periode 1980 ... 1990 op basis van een jaarlijks groeipercentage van 11% (verdubbeling in 7 jaar). Deze vergelijking is in fig. 2 uitgezet.

Hieruit volgt dat, indien FM/FDMA wordt gebruikt, het systeem bij de aanvang van het gebruik in 1980 volledig kan worden gevuld, als men maximaal $\frac{2}{3}$ van het totale verkeer op routes boven 1200 km op het satellietsysteem toelaat; deze fractie neemt in de loop der jaren af tot minder dan $\frac{1}{3}$ in 1990. Een systeem met PCM/TDMA heeft na het begin in 1980 bij belasting met maximaal $\frac{2}{3}$ van het totale verkeer circa 4 jaar nodig om volbelast te raken; in de daarop volgende periode neemt de fractie van het satellietverkeer t.o.v. het totale verkeer weer af tot ca. $\frac{1}{2}$ in 1990. De fracties van resp. $\frac{1}{3}$ en $\frac{2}{3}$ zijn de onder- en bovengrens; bij de PTT-administraties bestaat nl. het streven om – in het geval van de beschikbaarheid over twee alternatieve media met ongelijksoortige kwetsbaarheid – het verkeer gelijkelijk over deze beide media te verdelen, zodat bij calamiteiten ca. 50% van de transmissie-capaciteit beschikbaar blijft.

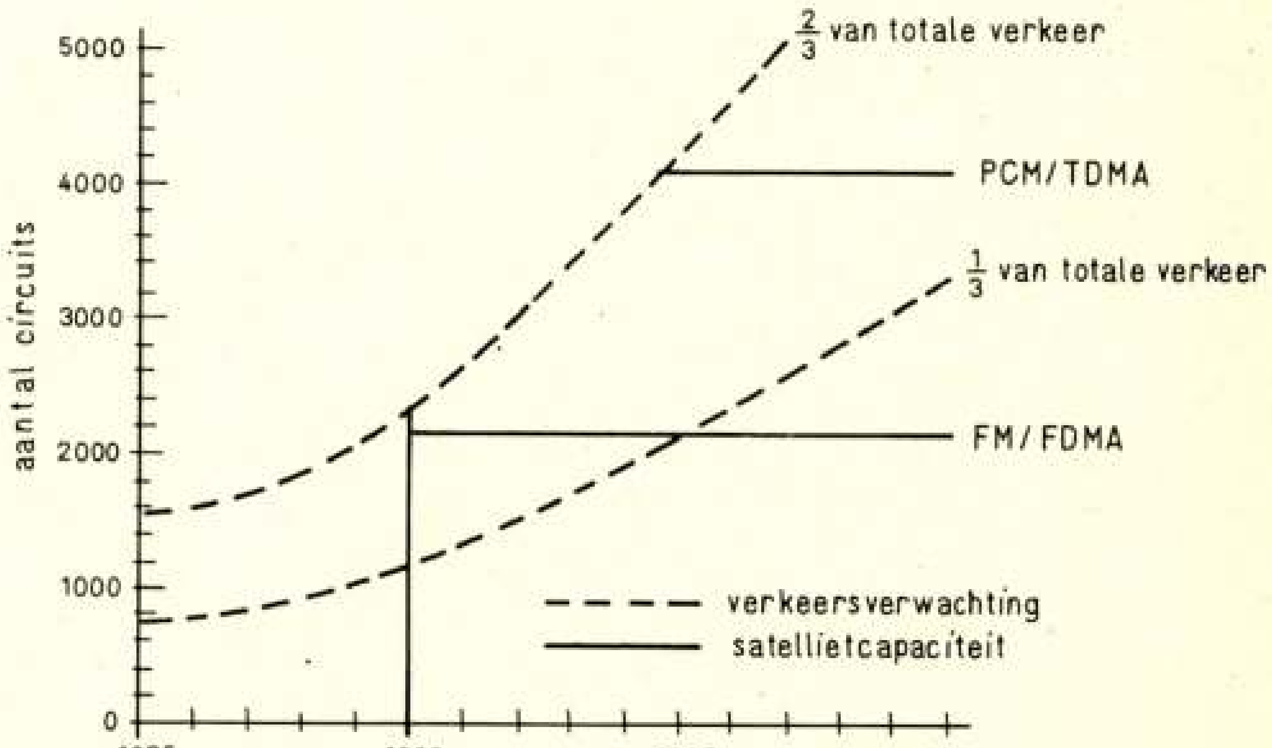


Fig. 2. Verband tussen (enerzijds) de verkeersbehoefte in de loop der jaren (de gestippelde krommen) en (anderzijds) de beschikbare satellietcapaciteit in fase II (de getrokken lijnen).

[2)]CCIR = Comité Consultatif International des Radiocommunications.

Voor economische berekeningen is uiteraard het *gemiddelde* aantal circuits dat door het systeem in de periode 1980 tot 1990 wordt verwerkt van belang; voor FM/FDMA is dit ca. 2000, voor PCM/TDMA ca. 3800.

4. Lanceerpolitiek

In verband met het feit dat het effectueren van een lancering ca. 3 maanden vergt, dient voor het hier beschreven systeem een reserve-satelliet in een stationaire baan aanwezig te zijn. Door ESRO is berekend dat, bij een kans op een geslaagde lancering van 0,7 en een levensduur van de satelliet van 5 jaar (70% betrouwbaarheidsgraad), voor een periode van 10 jaar de kans dat men slechts 8 satellieten behoeft te lanceren 70% bedraagt. De kans, dat men met 10 satellieten uitkomt, bedraagt 90%.

Indien men – door keuze van een andere lanceerraket – de kans op een geslaagde lancering tot 0,9 kan opvoeren heeft men onder overigens dezelfde aannamen aan 6, resp. 8 satellieten genoeg. In beide gevallen is de kans op een uitval van het systeem (d.w.z. een capaciteit van minder dan $\frac{2}{3}$ van de geplande capaciteit) gedurende 3 maanden of langer in een 10-jaar-periode kleiner dan 15%.

5. Experimentele fase

Er wordt voorgesteld, vóór de aanvang van de operationele periode 1980 ... 1990 een fase I-satelliet met 4 transponders en een massa van ca. 200 kg te ontwikkelen en te lanceren. Deze satelliet heeft een capaciteit van ca. 1000 telefooncircuits plus 1 TV-kanaal; zij wordt verondersteld te werken met gemiddeld 10 grondstations in de periode 1975 ... 1980. Het ontwerp van deze satelliet dient gelijk te zijn aan dat van de hiervóór beschreven 'fase-II'-satelliet, daar alleen dan ten volle van de opgedane ervaringen kan worden geprofiteerd. Voor de modulatie-methode geldt hetzelfde, zodat de eerste 10 grondstations (qua opzet ongewijzigd) ook voor de aansluitende operationele periode bruikbaar blijven.

Uit het NERG

Administratie van het NERG: Postbus 39, Leidschendam. Giro 94746 t.n.v. penningmeester NERG, Leidschendam. Secretariaat van de Examencommissie-NERG: van Geusaustraat 151, Voorburg.

Ledenmutaties

Voorgestelde leden
Ir. A. A. Dogterom, Nieuwlandseweg 8, Hilversum.

Nieuwe leden
W. J. Kramer, Goeverneurkade 147, Voorburg.
Ir. J. van der Plaats, Eppe 1, Geldrop.
Ir. Th. J. de Vries, Marathonstraat 82, Purmerend.

Nieuwe adressen van leden
Ir. J. F. Brouwer, Naarderweg 62, Blaricum.
Ir. J. Th. R. Schreuder, Prins Frederiklaan 394, Leidschendam.
J. van Staveren, Stadhoudersring 170, Zoetermeer.
Ir. J. B. F. Tasche, Hendrik Broertjesstraat 13, Den Helder.
P. Vijzelaar, p/a W. Bontekoestraat 25, Hilversum.
Ir. J. D. Zijp, Deylerweg 30, Wassenaar.

Vederprijs 1969

Het Bestuur van de Stichting Wetenschappelijk Radiofonds Veder heeft in zijn jongste jaarvergadering met algemene stemmen besloten tot het toekennen van de Vederprijs 1969 aan de heren P. J. van Gerwen en E. C. Dijkmans, beiden te Eindhoven, wegens hun succesvolle toepassing van circuit-integratie op grote schaal voor de realisering van een efficient systeem voor data-transmissie. Dit houdt in, dat elektronische microschakelingen zijn ontworpen en gerealiseerd welke dienen om rekenmachine-gegevens over de telefoonlijn te kunnen zenden, zodat de rekenmachine op afstand via het normale telefoonnetwerk kan worden gebruikt.

De Vederprijs bestaat uit een som gelds en de gouden Vedermedaille.

Aan het einde van de vergadering, die door het Nederlands Elektronica en Radiogenootschap in het Auditorium van de T.H. Eindhoven werd gehouden, heeft prof. dr. ir. A. A. Th. M. van Trier – als bestuurslid van het Wetenschappelijk Radiofonds Veder – de betekenis van het werk van de heren Van Gerwen en Dijkmans nader onder de aandacht gebracht; mevrouw C. E. van Hoboken-Veder, voorzitster van het fonds, heeft daarna de prijzen aan de beide winnaars uitgereikt.

Varia

ITT bestaat vijftig jaar

Op 16 juni 1970 bestaat de ITT (International Telephone & Telegraph Corporation) vijftig jaar. Het door de gebroeders Sosthenes en Hernand Behn opgerichte bedrijf heeft nu ongeveer 353000 medewerkers in dienst; het behaalde in 1969 een omzet van 5 miljard dollar.

De basis voor de groei van dit multinationale concern werd door de gebroeders Behn in 1925 in Europa gelegd door de overname van alle niet-Amerikaanse fabrieken van de American Telephone and Telegraph Company. Ook nu nog speelt bijna de helft van alle activiteiten zich in Europa af, waar ITT in vijftien landen vestigingen heeft zoals Graetz, Standard Elektrik Lorenz (Duitsland), Bell Telephone Manufacturing Company (België), Standard Telephone & Cables (Engeland), Le Materiel Téléphonique (Frankrijk) en Standard Electric ITT (Nederland).

ITT is echter niet alleen op het gebied van de telecommunicatie en elektronica werkzaam. Vooral sinds de tweede wereldoorlog is het diversificatie-idee de grondslag geweest voor een doorbraak in de richting van o.a. de voedsel-industrie, het verzekeringswezen, autoverhuur, huizenbouw, hotelexploitatie, enz. Hieraan zijn namen verbonden als Continental Banking, Avis Rent-A-Car, Sheration Hotels, Hamilton Life Insurance Company.

ITT Persbericht nr. 445, 12 juni 1970.